

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN PURA
DE SECCIONES TIPO CAJÓN A PARTIR DE PERFILES DE ACERO
EN “C” LAMINADOS EN FRÍO CON DIFERENTES
CONFIGURACIONES DE SOLDADURA**

WALTER CAMILO TOVAR COQUIES

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
2017**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN PURA
DE SECCIONES TIPO CAJÓN A PARTIR DE PERFILES DE ACERO
EN “C” LAMINADOS EN FRÍO CON DIFERENTES
CONFIGURACIONES DE SOLDADURA**

I.C. WALTER CAMILO TOVAR COQUIES

**Proyecto de grado para optar al título de magíster en ciencias de ingeniería
civil con énfasis en estructuras.**

Director: Andrés Guzmán, PhD.

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
2017**

Nota de aceptación:

Andrés Guzmán, PhD.
Director.

Revisor.

Jurado.

Jurado.

Barranquilla, marzo de 2017

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| INTRODUCCIÓN | - 10 - |
| OBJETIVOS | - 17 - |
| ANTECEDENTES | - 18 - |
| 1. MARCO TEÓRICO | - 20 - |
| 1.1 El acero y sus propiedades. | - 21 - |
| 1.2 Diseño de elementos a compresión según el NSR-10. | - 23 - |
| 1.2.1 Diseño por esfuerzos admisibles. | - 23 - |
| 1.2.2 Diseño por factores de carga y resistencia. | - 24 - |
| 1.2.2.1 Miembros cargados a compresión cargados concéntricamente | - 24 - |
| 1.2.2.2 Miembros a compresión compuestos por dos secciones en contacto | - 26 - |
| 1.2.2.3 Miembros de compresión en sección cajón por dos secciones C en contacto | - 27 - |
| 1.3 Método de los elementos finitos. | - 28 - |
| 2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN | - 30 - |
| 2.1 Fase Experimental | - 31 - |
| 2.1.2 Instrumentación. | - 39 - |
| 2.1.3 Condiciones de apoyo. | - 42 - |
| 2.1.4 Ensayos a compresión con carga axial. | - 43 - |
| 2.2 Fase analítica | - 55 - |
| 2.2.1 Estimación de las relaciones de esbeltez. | - 55 - |
| 2.2.2 Estimación del mínimo esfuerzo de pandeo flector elástico, de pandeo torsional y de pandeo flexo torsional. | - 57 - |
| 2.2.3 Estimación de la resistencia nominal para carga concentrada | - 58 - |
| 2.2.4 Estimación de la relación carga-desplazamiento: modelo de pandeo lineal en COMSOL®. | - 59 - |
| 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS. | - 64 - |
| 3.1 Comparación de los resultados experimentales vs teóricos y computacionales. | - 68 - |
| | - 4 - |

4. ECUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO PARTICULAR PARA LOS PERFILES ENSAYADOS. - 69

-

5. CONCLUSIONES_____ - 72 -

6. RECOMENDACIONES_____ - 74 -

BIBLIOGRAFÍA_____ - 75 -

LISTA DE TABLAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <i>Tabla 1 Discriminación pruebas según tipo de apoyo y separación entre cordones de soldadura</i> | <i>_____ - 31 -</i> |
| <i>Tabla 2 Cantidad y ubicación de los deformímetros en las probetas</i> | <i>_____ - 42 -</i> |
| <i>Tabla 3 Determinación del factor (a/r_i) para cada una de las longitudes de espaciamiento</i> | <i>_____ - 56 -</i> |
| <i>Tabla 4 Determinación de esfuerzo de pandeo elástico</i> | <i>_____ - 58 -</i> |
| <i>Tabla 5 Estimación de la resistencia nominal para carga concentrada</i> | <i>_____ - 58 -</i> |
| <i>Tabla 6 Valores de carga axial concéntrica para cada método usado</i> | <i>_____ - 67 -</i> |
| <i>Tabla 7 Porcentaje de carga analítica con respecto al valor de carga experimental</i> | <i>_____ - 68 -</i> |
| <i>Tabla 8 Valores de omega para casos estudiados</i> | <i>_____ - 71 -</i> |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <i>Ilustración 1 Estructura en acero conformado en frío.</i> | - 10 - |
| <i>Ilustración 2 Configuración geométrica y calibre de fabricación (Dimensiones en mm, imagen propia)</i> | - 12 - |
| <i>Ilustración 3 Pandeo local</i> | - 13 - |
| <i>Ilustración 4 Uso de perfiles tipo cajón conformados con secciones 'C'</i> | - 14 - |
| <i>Ilustración 5 Cubierta de parqueadero de automotores</i> | - 15 - |
| <i>Ilustración 6 Estructura de cubierta en perfiles galvanizados en lámina delgada</i> | - 15 - |
| <i>Ilustración 7 Edificaciones grandes y altas en perfiles de lámina delgada</i> | - 20 - |
| <i>Ilustración 8 Efecto del trabajo de formación en frío</i> | - 21 - |
| <i>Ilustración 9 Esfuerzos residuales debidas al proceso de formado en frío del perfil [19]</i> | - 22 - |
| <i>Ilustración 10 Apoyo inferior tipo rótula</i> | - 32 - |
| <i>Ilustración 11 Apoyo tipo empotramiento</i> | - 33 - |
| <i>Ilustración 12 Soportes de concreto simple como apoyos para marco de carga</i> | - 34 - |
| <i>Ilustración 13 Distancias entre cordones de soldaduras (mm)</i> | - 35 - |
| <i>Ilustración 14 Transductor Potenciométrico de Cuerda</i> | - 36 - |
| <i>Ilustración 15 Transductor de Desplazamiento Potenciométrico</i> | - 37 - |
| <i>Ilustración 16 Galgas de deformación</i> | - 37 - |
| <i>Ilustración 17. Celda de carga</i> | - 38 - |
| <i>Ilustración 18 Sistema de adquisición de datos y control</i> | - 38 - |
| <i>Ilustración 19 Vista en planta de ubicación de los transductores de desplazamiento vertical</i> | - 39 - |
| <i>Ilustración 20 Vista frontal de la ubicación de los transductores de desplazamiento horizontal</i> | - 39 - |
| <i>Ilustración 21 Vista frontal de la ubicación de galgas extensiométricas</i> | - 40 - |
| <i>Ilustración 22 Vista frontal del montaje típico de todas las probetas definitivas ensayadas</i> | - 40 - |
| <i>Ilustración 23 Vista lateral del montaje típico de todas las probetas definitivas ensayadas</i> | - 41 - |
| <i>Ilustración 24 Perspectiva montaje típico</i> | - 41 - |
| <i>Ilustración 25 Longitudes efectivas teóricas de columnas para varias condiciones de apoyo ((McCormac 2012))</i> | - 42 - |
| <i>Ilustración 26 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 475mm (L/4) ensayados apoyos empotrado – articulado EA</i> | - 43 - |
| <i>Ilustración 27 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 633mm (L/3) ensayados apoyos empotrado - articulado EA</i> | - 44 - |
| <i>Ilustración 28 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 0mm (CORRIDA) ensayados apoyos empotrado – articulado EA</i> | - 44 - |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <i>Ilustración 29 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 633mm (L/3)</i> | |
| <i>ensayados apoyos articulado – articulado AA.....</i> | <i>- 45 -</i> |
| <i>Ilustración 30 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 475mm (L/4)</i> | |
| <i>ensayados apoyos articulado - articulado AA</i> | <i>- 45 -</i> |
| <i>Ilustración 31 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 0mm (CORRIDA)</i> | |
| <i>ensayados apoyos articulado – articulado AA.....</i> | <i>- 46 -</i> |
| <i>Ilustración 32 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/4 (475 mm)</i> | |
| <i>con condición de apoyos empotrado – articulado correspondientes a las pruebas # 8, 9 y 10.....</i> | <i>- 47 -</i> |
| <i>Ilustración 33 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/3 (633 mm)</i> | |
| <i>con condición de apoyos empotrado – articulado correspondientes a las pruebas # 11, 12 y 13.....</i> | <i>- 47 -</i> |
| <i>Ilustración 34 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura corrida (0 mm)</i> | |
| <i>con condición de apoyos empotrado – articulado correspondientes a las pruebas # 14, 15 y 16.....</i> | <i>- 48 -</i> |
| <i>Ilustración 35 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/4 (475 mm)</i> | |
| <i>con condición de apoyos articulado – articulado correspondientes a las pruebas # 19, 22 y 23</i> | <i>- 49 -</i> |
| <i>Ilustración 36 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/3 (633 mm)</i> | |
| <i>con condición de apoyos articulado – articulado correspondientes a las pruebas # 17, 18 y 24</i> | <i>- 49 -</i> |
| <i>Ilustración 37 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura corrida (0 mm)</i> | |
| <i>con condición de apoyos articulado – articulado correspondientes a las pruebas # 20, 21 y 25.....</i> | <i>- 50 -</i> |
| <i>Ilustración 38 Superposición de la curva de carga contra desplazamiento de la prueba # 22 con la recta asociada a la correspondiente del comportamiento elástico.....</i> | <i>- 51 -</i> |
| <i>Ilustración 39 Superposición de las curvas de carga contra desplazamiento de las pruebas # 20 y # 21 con las rectas de sus elásticas respectivamente</i> | <i>- 51 -</i> |
| <i>Ilustración 40 Valores de carga máxima para cada configuración de soldadura y para cada condición de apoyo.....</i> | <i>- 52 -</i> |
| <i>Ilustración 41 Deformación unitaria promedio al 95% de la carga máxima EA L/4</i> | <i>- 53 -</i> |
| <i>Ilustración 42 Deformación unitaria promedio al 95% de la carga máxima EA L/3.....</i> | <i>- 53 -</i> |
| <i>Ilustración 43 Deformación unitaria promedio al 95% de la carga máxima EA Corrido</i> | <i>- 53 -</i> |
| <i>Ilustración 44 Deformación promedio de las 6 galgas con la configuración de soldadura @L/4 (475 mm)</i> | |
| <i>apoyos empotrado-articulado</i> | <i>- 54 -</i> |
| <i>Ilustración 45 Deformación promedio de las 6 galgas con la configuración de soldadura @L/3 (633 mm)</i> | |
| <i>apoyos empotrado-articulado</i> | <i>- 54 -</i> |
| <i>Ilustración 46 Deformación promedio de las 6 galgas con la configuración de soldadura @CORRIDA (0 mm)</i> | |
| <i>apoyos empotrado-articulado</i> | <i>- 55 -</i> |
| <i>Ilustración 47 COMSOL Articulado-articulado corrido</i> | <i>- 60 -</i> |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <i>Ilustración 48 COMSOL Articulado-articulado $a=475\text{mm}$.....</i> | <i>- 61 -</i> |
| <i>Ilustración 49 COMSOL Articulado-articulado $a=633\text{mm}$.....</i> | <i>- 61 -</i> |
| <i>Ilustración 50 COMSOL Empotrado-articulado corrido.....</i> | <i>- 62 -</i> |
| <i>Ilustración 51 COMSOL Empotrado-articulado $a=475\text{mm}$</i> | <i>- 62 -</i> |
| <i>Ilustración 52 COMSOL Empotrado-articulado $a=633\text{mm}$</i> | <i>- 63 -</i> |
| <i>Ilustración 53 Articulado-articulado $a=0\text{mm}$.....</i> | <i>- 64 -</i> |
| <i>Ilustración 54 Articulado-articulado $a=475\text{ mm}$.....</i> | <i>- 65 -</i> |
| <i>Ilustración 55 Articulado-articulado $a=633\text{mm}$.....</i> | <i>- 65 -</i> |
| <i>Ilustración 56 Empotrado-articulado $a=0\text{mm}$</i> | <i>- 66 -</i> |
| <i>Ilustración 57 Empotrado-articulado $a=475\text{mm}$</i> | <i>- 66 -</i> |
| <i>Ilustración 58 Empotrado-articulado $a=633\text{mm}$</i> | <i>- 67 -</i> |

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la utilización de elementos estructurales de acero laminados en frío en estructuras aporticadas está en constante aumento, a causa de varios factores importantes como lo son su bajo costo por ser un material liviano, la fácil manipulación y transporte y la gran versatilidad con que se acoplan a sistemas estructurales conformados por miembros de acero laminado en caliente o de hormigón reforzado Ilustración 1. En Colombia se ha implementado la conformación de secciones compuestas empleando el acoplamiento entre sí de perfiles de acero laminados en frío, con el fin de propiciar mejores propiedades geométricas y mecánicas a un menor costo.

Ilustración 1 Estructura en acero conformado en frío.



Los códigos de diseño actuales como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en su título F-4 (AIS 2010), y el Estándar del *American Iron and Steel Institute* AISI S100-12 (AISI 2002), establecen los parámetros de diseño para elementos sometidos a compresión pura conformados por secciones

tipo cajón a partir de perfiles de acero en “C” laminados en frío con diferentes configuraciones de soldadura.

Actualmente, se han realizado estudios sobre el comportamiento estructural de este tipo de perfiles de acero laminados en frío pero estos no responden a las necesidades constructivas actuales como la separación de soldaduras, su tipo, condiciones de apoyo, etc.

En el primer tercio del siglo pasado, el escaso número de especificaciones de diseño ocasionó que la industria de los perfiles conformados en frío presentará muchísimas dificultades. Debido a esta situación, en 1939 el Comité AISI (AISI 2002) (*American Iron and Steel Institute*, entonces denominado “*Committee on Building Codes*”) propuso un proyecto de investigación encabezado por el profesor G. Winter (Chajes, Britvec, y Winter 1963) cuya finalidad fue el desarrollo de metodologías de diseño que permitieran modelar el comportamiento de los perfiles de acero conformados en frío.

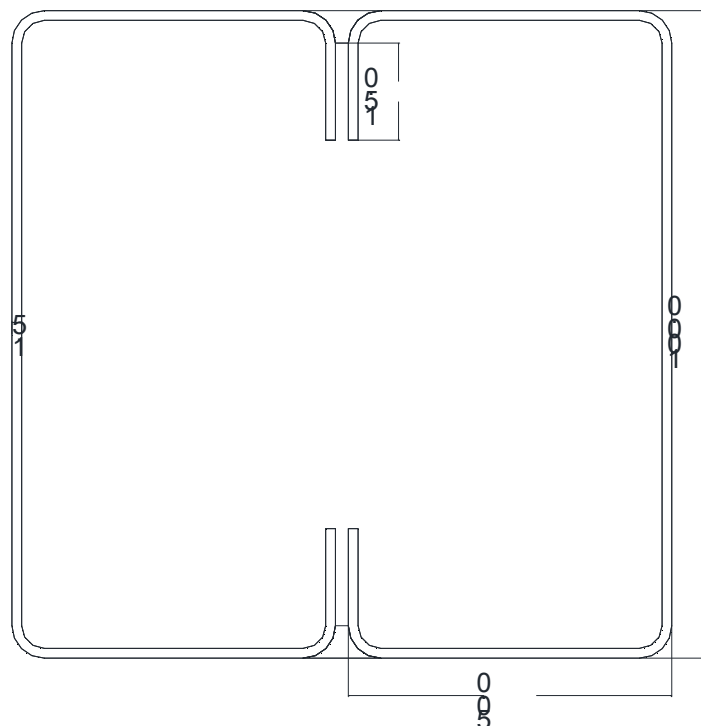
Mundialmente, las investigaciones más sobresalientes sobre el análisis y diseño de perfiles conformados en frío han sido realizados por W. Yu (Yu y LaBoube 2010), G. Winter (Uribe y Winter 1969) y W. Smith (Smith 1951), a mitad del siglo XX. El *American Iron and Steel Institute, AISI* [2] y el *American Institute of Steel Construction, AISC* (AISC 2005) son instituciones que han invertido en investigaciones de este tipo, y en Colombia, se tienen instituciones pioneras en este mismo ámbito investigativo como la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes y la Universidad del Norte en muchos casos de la mano de empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de acero laminado en frío.

Las actuales normas que rigen el diseño de los perfiles laminados o conformados en frío, cuando hacen parte de una sección compuesta y se encuentran bajo la acción de fuerzas de compresión, se basan en los resultados de estudios sobre su

comportamiento en cuanto al esfuerzo axial y el espaciamiento entre sus conectores o cordones de soldadura (Ilustración 2).

La soldadura utilizada para conformar las secciones armadas fue soldadura 6011 con diámetro de 1/8" mediante cordones continuos y discontinuos de 5 cm de longitud. Esta soldadura no es la adecuada para el acero laminado en frío, pues se debió utilizar la MIG que es la recomendada para este material, debido a que entrega mejores resultados en cuanto a acabado, es de fácil aplicación sin importar la posición desde donde se aplique, menor formación de gases contaminantes y ofrece un proceso semiautomático con alta productividad (menos dependiente de la habilidad del operador). Sin embargo, se usó la 6011 pues es esta la comúnmente utilizada en la práctica en construcción.

Ilustración 2 Configuración geométrica y calibre de fabricación (Dimensiones en mm, imagen propia)



En las experiencias realizadas se evidenció que los perfiles presentan pandeos locales como el presentado en la Ilustración 3 Pandeo local

Los elementos sometidos a fuerzas de compresión experimentan pandeos locales Ilustración 3 asociados a las condiciones de extremos del elemento (conexiones) y a la relación geométrica entre la distancia entre los cordones de soldadura y también su calibre de fabricación.

Ilustración 3 Pandeo local



En este tipo de perfiles también se presenta un fenómeno conocido como post-pandeo, como consecuencia de la redistribución y reagrupación de esfuerzos después del pandeo local y esto conlleva a que generalmente el diseño quede limitado a la falla del elemento estructural. Se considera en el medio académico que el cálculo preciso de la capacidad debería considerar esta resistencia.

Es común apreciar secciones dobles, triples y hasta cuádruples conformadas a partir de secciones C sencillas y unidas mediante soldadura eléctrica. Sin embargo, en esta clase de miembros, la norma AISI (AISI 2002) no presenta la suficiente profundidad para establecer su funcionamiento con total claridad. El comportamiento predicho por las formulaciones del AISI (AISI 2002) es dependiente de la unión que se realiza (soldadura) y utiliza reducciones de las

capacidades máximas que podrían no estar dentro del orden de lo que realmente sucede al miembro así conformado.

Hoy en día, los perfiles galvanizados de poco espesor se emplean usualmente como elementos resistentes principales en construcciones pequeñas y como elementos secundarios en edificios y estructuras de gran envergadura (Ilustración 4).

Ilustración 4 Uso de perfiles tipo cajón conformados con secciones 'C'



Sin embargo, su aplicación fundamental está orientada a la construcción de viviendas prefabricadas (industrializada) formando parte de la estructura completa de la vivienda o en forma parcial. Los perfiles tipo cajón conformados con secciones 'C', son usualmente usados en Colombia en cerchas de cubiertas

metálicas, como correas de cubiertas, y como viguetas de entrepisos metálicos, en parqueaderos y zonas públicas de estacionamiento (Ilustración 5 e Ilustración 6).

Ilustración 5 Cubierta de parqueadero de automotores



Por su parte, el AISC (AISC 2005), ha desarrollado investigaciones que pretenden acercarse más al comportamiento real por medio de relaciones que permiten obtener un valor más cercano de la capacidad máxima axial del miembro estructural dependiendo de la soldadura de unión de dos secciones simples y de sus condiciones de apoyo. En dicha tarea se han puesto en consideración estudios como es el caso de los realizados por autores como Aslani (Aslani y Goel 1991).

Ilustración 6 Estructura de cubierta en perfiles galvanizados en lámina delgada



En la presente investigación se evalúa el comportamiento estructural ante compresión pura de las secciones cajón conformadas por dos secciones “C” de lámina delgada con diferentes configuraciones de soldadura.

El trabajo investigativo se realiza en dos frentes, uno de tipo analítico y otro de tipo experimental. En el desarrollo de la parte analítica se tuvieron en cuenta los criterios descritos por la AISI (AISI 2002) y la teoría de elementos finitos; con estas herramientas se crearon modelos matemáticos en el paquete computacional de modelación de elementos finitos (COMSOL 2014), el cual nos proporciona un mejor entendimiento del comportamiento lineal del material. En la parte experimental se probaron en el laboratorio perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15 de 1.5 mm de espesor, de los cuales se ensayaron 18 probetas con longitudes de 2000 mm y separaciones de cordones de soldadura de $L/3$, $L/4$ y corrida o continua, utilizando a su vez dos condiciones de apoyo: empotrado-articulado y articulado-articulado.

A lo largo de la investigación se estudia el cómo se presenta el pandeo lineal en el elemento y cómo es la capacidad de carga a compresión pura teniendo en cuenta las diferentes configuraciones de las separaciones de los cordones de soldadura y las diferentes condiciones de apoyo mencionadas.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Estudiar el comportamiento de columnas tipo cajón constituidas por perfiles de acero laminados en frío con secciones transversales tipo “C”, con diversos arreglos de soldadura ante cargas de compresión pura para verificar su cumplimiento de acuerdo con los parámetros establecidos por el reglamento NSR-10.

Objetivos específicos:

- ❖ Establecer la resistencia teórica de las columnas tipo cajón laminadas en frío, teniendo en cuenta la separación de los cordones de soldadura a lo largo de su longitud y diferentes condiciones de apoyo.
- ❖ Evaluar la resistencia experimental de las columnas tipo cajón laminadas en frío, para diferentes separaciones de cordones de soldadura a lo largo de su longitud y diferentes condiciones de apoyo.
- ❖ Validar el modelo computacional y valorar los efectos que causan las distintas configuraciones de los cordones de soldadura en el comportamiento y resistencia de las columnas ante cargas axiales de tipo concéntrico.
- ❖ Evaluar la práctica común en construcción de estos tipos de secciones armadas comparándolas con lo establecido por el reglamento NSR-10 y determinar si están acordes con los parámetros actuales de diseño.

ANTECEDENTES

Los primeros indicios de evaluaciones del comportamiento estructural del acero conformado en frío aparecieron en reuniones técnicas sobre hierro y acero en la década de los años 50 del siglo XX. El inicio del camino para desarrollar las bases de diseño para la utilización del acero laminado en frío fue un proyecto de investigación en la *Cornell University* en 1963, bajo la dirección de Uribe (Uribe y Winter 1969), y auspiciado por el (AISI 2002).

Las investigaciones más destacadas fueron los trabajos de W. Yu (Hsiao, Yu, y Galambos 1990), las publicaciones de (Rasmussen y Hancock 1993) sobre el comportamiento a flexión, las obras del investigador *Korvink* (1995) de la *Rand Afrikaans University* (Korvink, Van den Berg, y Van der Merwe 1995) y *Van den Berg* (2000) (Van Den Berg 2000) con su labor sobre la capacidad estructural de secciones ligeras

También es preciso destacar las publicaciones derivadas de trabajos de investigación realizados por el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña Arnedo (1995) y Mirambell (1998 y 2000) (Mirambell y Real 2000).

Algunos investigadores han profundizado aún más en el comportamiento de los perfiles formados con lámina delgada sometidos a cargas concentradas, como J. Uribe, y G. Winter (1969) (Uribe y Winter 1969) quienes estudiaron los efectos de la conformación en frío sobre las propiedades y el desempeño de este tipo de perfiles; igualmente, presentaron los aspectos generales del estudio de los miembros de acero laminado en frío sometidos a flexión (vigas y correas). R. Cedeño y J.C. Gatica (2005) determinaron analítica y experimentalmente la capacidad resistente a flexión y cortante de perfiles de acero basándose en los criterios de diseño de Factores de Carga y Resistencia establecida en el

reglamento del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC) (Cedeño-Rosete y Gatica-Galina 2005).

Con base en lo anteriormente expuesto, el conocimiento del acero conformado en frío como material estructural se puede considerar relativamente novedoso. Hoy, varios investigadores en el mundo, se encuentran estudiando el comportamiento de las estructuras hechas utilizando este material, y en particular, aspectos relacionados con el dimensionamiento y verificación de las propiedades según la configuración de la sección.

Específicamente, en el tema del comportamiento a compresión de este tipo de perfiles se referencian los trabajos de Kulatunga (Kulatunga et al. 2014) y Liew (Liew y Gardner 2015).

En el ámbito nacional se destacan las investigaciones de W. Reyes y A. Guzmán (2011) (Reyes y Guzmán 2011) cuyo trabajo trata el efecto de la longitud y separación del cordón de soldadura en el comportamiento de secciones de acero formado en frío tipo cajón cerrado a partir de perfiles secciones C sometidos a compresión, trabajo que fue la fase inicial de la presente investigación en donde se consideran elementos de mayor longitud estudiando el fenómeno del pandeo y aplicando una mayor instrumentación para obtener más evidencia del comportamiento de los perfiles bajo estudio.

1. MARCO TEÓRICO

Hoy en día en Colombia, el mercado del acero nacional cuenta con una serie de perfiles laminados en frío dentro de los cuales se destacan los que poseen secciones tipo I, C, Z, cajón, tubulares, entre muchas otras. Estos elementos de acero conformados en frío se utilizan como elementos resistentes primarios en construcciones menores y como elementos secundarios en edificaciones de mayores proporciones, aunque en la actualidad se ha notado su utilización informal como elementos estructurales principales en edificaciones grandes y altas Ilustración 7.

Ilustración 7 Edificaciones grandes y altas en perfiles de lámina delgada



El Reglamento NSR-10 [1] es quien rige el diseño de los perfiles laminados en nuestro país, el cual en su capítulo F-4 (Estructuras de acero con perfiles de lámina formada en frío) define las especificaciones y criterios de diseño para su adecuada utilización como material en elementos estructurales. Dicho capítulo se basa en las teorías presentadas en la norma AISI (AISI 2002).

Seguidamente, presentamos un resumen de los conceptos presentados en el NSR-10 (AIS 2010) que serán utilizados para el desarrollo de la presente

investigación y se utilizarán para realizar las comparaciones entre los resultados teóricos y los experimentales obtenidos en las pruebas realizadas en el laboratorio.

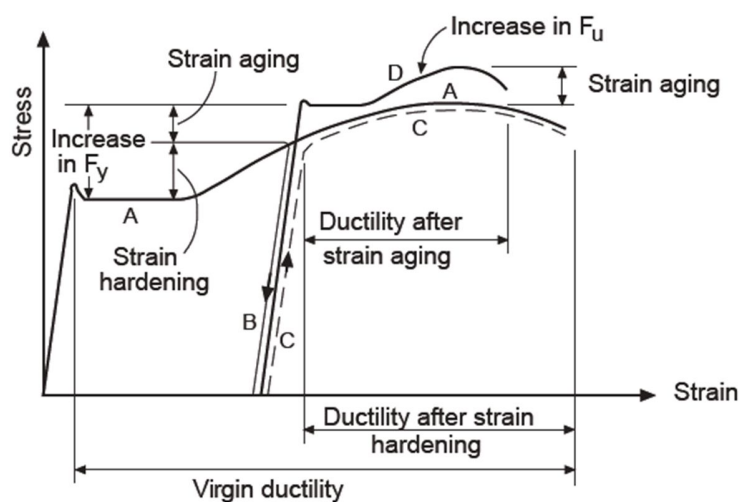
1.1 El acero y sus propiedades.

El NSR-10 (AIS 2010), posibilita el uso de aceros de calidad estructural según lo definido en las especificaciones NTC (Normas Técnicas Colombianas) o ASTM (*American Section of the International Association for Testing Materials*); los perfiles laminados en frío utilizados en esta investigación usan acero NTC 4011 (ASTM A653) Grado 50 (340 MPa).

1.1.1 Influencia del trabajo de deformaciones en frío.

Varios resultados obtenidos de diferentes trabajos investigativos han dado fe que durante el proceso de laminado en frío (Ilustración 8), ocurre una reducción en la ductilidad del material, mientras que simultáneamente se evidencia un incremento de los valores de F_y y F_u , y a la vez los valores de ΔF_u son menores que ΔF_y , por lo tanto la relación F_u/F_y disminuye.

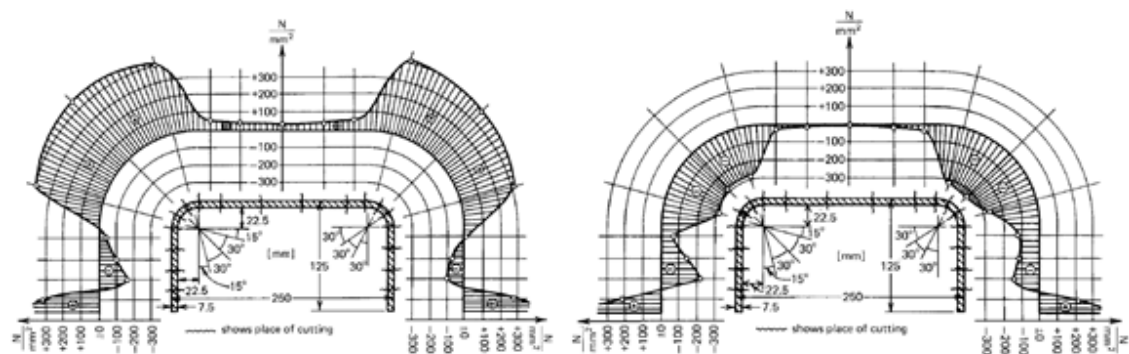
Ilustración 8 Efecto del trabajo de formación en frío



De igual manera existen indicios de que las propiedades mecánicas son distintas en las diferentes ubicaciones de la sección transversal del perfil, como por ejemplo en los bordes, pues están sometidos a un mayor trabajo de laminado que las zonas planas. El reglamento NSR-10 (AIS 2010) en las secciones F.4.3.2 y F.4.3.3.1, limita el incremento en la resistencia del perfil como consecuencia de la acción del conformado en frío, sin embargo esto permite reemplazar el esfuerzo promedio de fluencia de la sección completa (F_{ya}) por F_y .

Diversos estudios investigativos como los realizados por Wei Wen Yu (Yu y LaBoube 2010) han hecho referencia a la distribución de los esfuerzos residuales en los perfiles conformados en frío. Estos estudios están orientados a la búsqueda de una explicación que ayude a visualizar los motivos de la disminución en el límite de proporcionalidad que provoca un comportamiento inelástico del material mucho antes de lo esperado (Ilustración 9). En otras palabras, el material alcanza su fluencia con una carga de menor magnitud. Por lo anterior, se presentan esfuerzos residuales en las caras externas e internas de los perfiles bajo estudio. Se ha considerado que la presencia de los esfuerzos residuales no afecta en gran medida el valor de F_u .

Ilustración 9 Esfuerzos residuales debidas al proceso de formado en frío del perfil [19]



1.2 Diseño de elementos a compresión según el NSR-10.

El NSR-10 (AIS 2010) admite el diseño por esfuerzos admisibles únicamente en el diseño de tableros metálicos que trabajen en sección compuesta; para todos los demás diseños con miembros estructurales formados en frío, se debe usar el Diseño con Coeficientes de Carga y Resistencia (DCCR o LRFD por sus siglas en inglés).

1.2.1 Diseño por esfuerzos admisibles.

Vale la pena aclarar que este método no está aprobado en el entorno colombiano a menos que el diseño haya sido realizado bajo este criterio para una estructura que no estuviera acogida a la reglamentación de la NSR-10 (AIS 2010). Dicho método enfatiza que los esfuerzos calculados elásticamente, utilizando cargas reales, no deben exceder un valor límite especificado para cada material.”.

Esto se puede resumir en la Ecuación 1.

Ecuación 1 Diseño por esfuerzos admisibles.

$$R \leq \frac{R_n}{\Omega}$$

Dónde:

R=Resistencia admisible requerida.

R_n=Resistencia nominal especificada.

Ω= Factor de seguridad especificado.

R_n/Ω = Resistencia de diseño.

1.2.2 Diseño por factores de carga y resistencia.

Esta metodología se basa en dimensionar los componentes que conforman una estructura de tal manera que sus estados límites nunca sean superados por la resistencia de diseño, bajo ninguna combinación de carga asociada.

El diseño por este método debe ser realizado de acuerdo a la Ecuación 2.

Ecuación 2. Diseño por factores de carga y resistencia.

$$R \leq \phi \cdot R_n$$

Dónde:

ϕ = Coeficiente de resistencia.

R_n = Resistencia nominal.

ϕR_n = Capacidad o resistencia de diseño.

Los valores de los coeficientes de resistencia recomendados por el NSR-10 (Titulo F.4.3) son los siguientes:

$\phi_c = 0.85$ para compresión.

1.2.2.1 Miembros cargados a compresión cargados concéntricamente

La resistencia de diseño a carga axial debe ser el menor valor de los calculados de acuerdo con las secciones F.4.3.4.1, F.4.3.4.2, F.4.4.1.2, F.4.4.6.1.3, F.4.4.6.1.4 del NSR-10 (AIS 2010), según sea aplicable.

F.4.3.4.1 – Resistencia nominal por fluencia, pandeo flector, pandeo flexo-torsional y torsional cuya resultante de todas las cargas actuantes sobre el miembro es una carga axial que pasa a través del centroide de la sección efectiva calculada para el esfuerzo, F_n , definido en esta parte del reglamento.

La resistencia nominal bajo carga axial P_n , se calculará de acuerdo con la Ecuación 3.

Ecuación 3. Resistencia nominal bajo carga axial.

$$P_n = A_e \cdot F_n$$

Dónde:

A_e = área efectiva calculada con el esfuerzo F_n . Para secciones con huecos circulares, A_e debe determinarse de acuerdo con la sección F.4.2.2.2 (a), sujeta a las limitaciones de esa sección. Si el número de huecos en la región de longitud efectiva multiplicado por el diámetro del hueco y dividido por la longitud efectiva y no excede 0.015, A_e se puede determinar ignorando los huecos. Para miembros tubulares cilíndricos cerrados, A_e se calculará de acuerdo con las especificaciones de la sección F.4.3.4.1.5 de la NSR-10.

F_n es determinado de acuerdo a la Ecuación 4 y Ecuación 5.

Ecuación 4. Resistencia nominal para $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = \left(0.658^{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y$$

Ecuación 5. Resistencia nominal para $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y$$

Dónde:

Ecuación 6. Parámetro de esbeltez.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

F_e = es el valor mínimo del esfuerzo de pandeo flector elástico, de pandeo torsional y de pandeo flexo-torsional determinado de acuerdo con las secciones F.4.3.4.1.1 a la F.4.3.4.1.5 de la NSR-10.

1.2.2.2 Miembros a compresión compuestos por dos secciones en contacto

Para miembros en compresión de dos secciones en contacto, la resistencia axial de diseño se determina de acuerdo con la sección F.4.3.4.1(a) con la siguiente modificación. Según el NSR-10 (AIS 2010), si el modo de pandeo implica una deformación relativa que produce fuerzas cortantes en los conectores entre secciones individuales, (KL/r) se reemplaza por $(KL/r)_m$ calculado como sigue:

Ecuación 7. Relación de esbeltez modificada

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2}$$

Dónde:

$(KL/r)_0$ = Relación de esbeltez total de la sección completa alrededor del eje del miembro armado.

a = Espaciamiento del sujetador intermedio, punto o cordón de soldadura

r_i = Radio de giro mínimo del área transversal total no reducida de una sección individual en un miembro armado.

Adicionalmente, la resistencia del sujetador y su espaciamiento deben satisfacer lo siguiente:

- (1) El espaciamiento del sujetador intermedio, del punto o cordón de soldadura a , está limitado de tal forma que $\frac{a}{r_i}$ no excede la mitad de la relación de esbeltez que gobierne del miembro armado.
- (2) Los extremos de un miembro en compresión armado estarán conectados por soldadura con longitud no menor que el máximo ancho del miembro o por conectores espaciados longitudinalmente no más de cuatro (4) veces su diámetro sobre una distancia igual a 1.5 veces el ancho máximo del miembro.
- (3) Los sujetadores intermedios o soldaduras en cualquier punto de unión del miembro longitudinal serán capaces de transmitir una fuerza en cualquier dirección igual de 2.5% de la resistencia nominal axial del miembro armado.

1.2.2.3 Miembros de compresión en sección cajón por dos secciones C en contacto

Para miembros en sección cajón, formados a partir de dos secciones C en contacto a través de sus pestañas o labios rigidizadores y unidas por cordones intermitentes de soldadura, se tiene que:

Cuando $\left(\frac{a}{r_i}\right) > 50$

Ecuación 8. Relación de esbeltez modificada caso 1.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt[2]{\left(\frac{KL}{r}\right)^2 + \left(\frac{a}{r_i} - 50\right)^2}$$

Cuando $\left(\frac{a}{r_i}\right) \leq 50$

Ecuación 9.Relación de esbeltez modificada caso 2.

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \left(\frac{KL}{r}\right)_0$$

Todas las variables se definen y limitan en la sección F.4.4.1.2 de la NSR-10. El valor de a no excederá los 300 mm.

Precisamente, es esta limitante la que fundamenta la importancia de la presente investigación, pues interesa conocer el comportamiento de la sección cajón conformada a partir de dos secciones en C con acero formado en frío con una longitud a entre cordones de soldadura mayores a 300 mm debido a que en la práctica constructiva se utiliza la disminución del número de cordones a lo largo del elemento.

1.3 Método de los elementos finitos.

El método de los elementos finitos (MEF) es una herramienta que brinda mayores niveles de practicidad en la resolución de distintos problemas en la ingeniería. Con el auge de los computadores, este método numérico práctico ha tomado mayor protagonismo a causa de la rapidez con la que soluciona problemas que hace 50 años no eran factibles resolver.

Actualmente, el método de elementos finitos es considerado como la herramienta más potente y práctica para la resolución de problemas de ingeniería y aplicaciones en la física (análisis estáticos y dinámicos de estructuras).

El método de los elementos finitos se fundamenta en comprender el comportamiento del medio continuo a través de la fragmentación del mismo por

medio de elementos (elementos finitos) que se encuentran unidos entre sí mediante nodos. Todos los nodos vinculados a los elementos presentan varios grados de libertad que facilitan definir la deformación aproximada de cada uno de los elementos finitos si son conocidas las condiciones de contorno (restricciones, desplazamientos o fuerzas) y las ecuaciones constitutivas que enmarcan las relaciones desplazamiento-deformación, deformación-esfuerzos y fuerza-desplazamiento.

En esta investigación se plantea el análisis de modelos estáticos lineales de las columnas conformadas con perfiles “C” a través del programa COMSOL Multiphysics®.

COMSOL permitirá establecer las cargas, deformaciones y esfuerzos de los perfiles conformados en frío al ser sometidos a diferentes niveles de carga axial concéntrica, utilizando el siguiente procedimiento con la finalidad de idealizar y analizar la modelación:

- Modelado de la estructura: generación de la geometría del elemento. Comúnmente se usa un software tipo CAD para tal fin y luego se exporta a COMSOL.
- Establecer las propiedades mecánicas del material del elemento: definición de las propiedades mecánicas (modelo de material elástico lineal) del acero.
- Determinación de las condiciones de frontera: establecimiento de las restricciones que generan los apoyos que soportan la estructura que pueden ser articulados o empotrados para la presente investigación.
- Asignación de las cargas: se aplican las cargas al modelo, es muy común asignar las cargas que teóricamente serían las máximas que el elemento soportaría.
- Resolución del sistema de ecuaciones algebraicas lineales.

- Consecución de los resultados: se ordenan los resultados obtenidos tales como desplazamientos, deformaciones, acortamientos, entre otros, teniendo en cuenta la relación que guardan con las características particulares de cada modelo.
- Interpretación de los resultados obtenidos: se realiza el análisis de los resultados obtenidos y se determina si son consecuentes con el comportamiento esperado, puntualizando situaciones específicas y detalladas de cada modelo de manera particular.
- Confrontar los resultados obtenidos con la modelación y los arrojados por la fase experimental: procesados los resultados obtenidos se continúa comparándolos con los arrojados por la fase experimental y así preparar parámetros de diferenciación o similitud entre las dos situaciones.
- Conclusiones de la interpretación de resultados: se organizan los resultados de las comparaciones entre la fase de experimental y la fase de modelación, estableciendo semejanzas y diferencias entre las dos fases.
- Recomendaciones generales y específicas: establecer recomendaciones sobre cómo mejorar el proceso para futuras investigaciones sobre temas similares.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La parte experimental se desarrolló empleando perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15 de 1.5 mm de espesor (Ilustración 2) conformando cajones confrontados en sus pestañas.

Se ensayaron 18 probetas en sección cajón con longitudes de 2000 mm y separaciones de cordones de soldadura de L/3, L/4 y corrida (continua). Se utilizaron dos condiciones de apoyo: empotrado-articulado y articulado-articulado.

La Tabla 1 detalla cada una de las pruebas según los tipos de apoyo y la distancia entre los cordones de soldadura.

Tabla 1 Discriminación pruebas según tipo de apoyo y separación entre cordones de soldadura

| # PRUEBA | CONDICIÓN DE APOYO (INFERIOR-SUPERIOR). | SEPARACIÓN DE CORDÓN DE SOLDADURA CENTRO A CENTRO (mm). |
|----------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 8 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 475.00 |
| 9 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 475.00 |
| 10 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 475.00 |
| 11 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 633.33 |
| 12 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 633.33 |
| 13 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 633.33 |
| 14 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 0.00 |
| 15 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 0.00 |
| 16 | EMPOTRADO – ARTICULADO | 0.00 |
| 17 | ARTICULADO-ARTICULADO | 633.33 |
| 18 | ARTICULADO-ARTICULADO | 633.33 |
| 19 | ARTICULADO-ARTICULADO | 475.00 |
| 20 | ARTICULADO-ARTICULADO | 0.00 |
| 21 | ARTICULADO-ARTICULADO | 0.00 |
| 22 | ARTICULADO-ARTICULADO | 475.00 |
| 23 | ARTICULADO-ARTICULADO | 475.00 |
| 24 | ARTICULADO-ARTICULADO | 633.33 |
| 25 | ARTICULADO-ARTICULADO | 0.00 |

En el desarrollo de la presente investigación se discriminaron dos fases o etapas como lo son la modelación matemática (fase analítica) y las pruebas de laboratorio (fase experimental), que entre sí son complementarias y conllevan a mejores conclusiones.

2.1 Fase Experimental

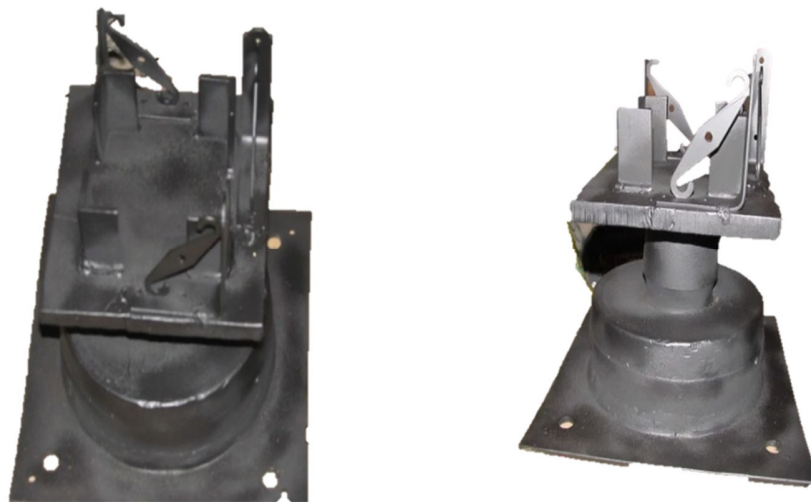
En la fase experimental se utilizaron un total de 25 especímenes de 2000 mm de longitud, los cuales fueron probados con tres configuraciones de soldadura como se indicó anteriormente (continua, L/3 y L/4) y con dos condiciones de apoyo (doblemente articulado y empotrado en la base y articulado en la parte superior).

Todos los perfiles en C utilizados fueron de acero galvanizado 100x50x15x1.5 mm. Las primeras 7 pruebas fueron destinadas para la indagación del comportamiento de la máquina, las probetas y el equipo de adquisición de datos. En estas probetas no se hizo uso de galgas para la medición de deformaciones unitarias.

Los cordones de soldadura se manejaron mediante separaciones centro a centro de 633.33 mm para la configuración de L/3 y de 475 mm para la configuración de L/4, teniendo en cuenta que por recomendación del NSR-10 en su aparte F.4.4.1.2 es necesario iniciar con un primer cordón de soldadura en cada uno de los extremos con una longitud igual a la menor distancia de la sección transversal del perfil.

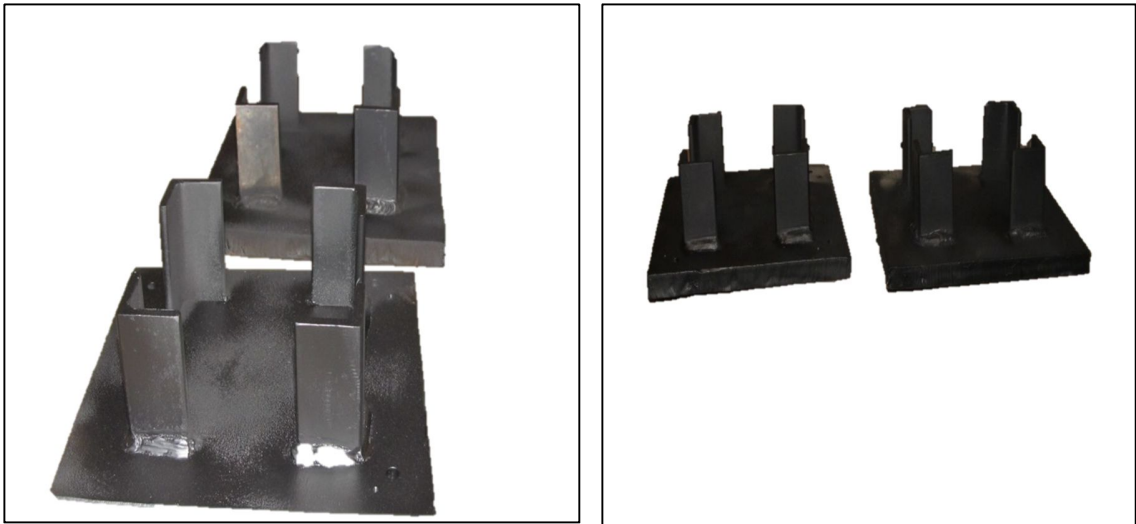
El sistema de apoyo empleado fue construido en acero tratando de simular las condiciones ideales para la columna (articulación o empotramiento). En la Ilustración 10 se aprecia en primer plano el apoyo inferior tipo rótula.

Ilustración 10 Apoyo inferior tipo rótula



El apoyo tipo empotramiento se observa en la Ilustración 11 y al igual que la rótula, en este se utilizaron unas guías para el posicionamiento del perfil dentro del apoyo y unas platinas para la instalación de los deformímetros para la medición del acortamiento de la longitud del espécimen. En la imagen se pueden observar los orificios realizados para los amarres de los hilos acerados que van conectados a los deformímetros verticales que medirán el acortamiento vertical de la probeta al aplicar la carga de compresión.

Ilustración 11 Apoyo tipo empotramiento



En el caso del apoyo empotrado se aclara que en la práctica corresponde a soldadura en todo el alrededor del perímetro de la sección transversal armada. Se debe tener en cuenta que en las probetas ensayadas con el apoyo inferior empotrado la longitud efectiva será menor que la teórica.

El marco de carga del laboratorio de geotecnia y materiales de construcción de la Universidad el Norte fue acondicionado para permitir experimentar con probetas de 2000 mm de longitud. En la parte superior se utilizó la rótula del actuador de la máquina como apoyo articulado para todas las pruebas realizadas.

En la Ilustración 12 se puede observar la instalación de soportes en concreto en cada una de las bases de las columnas del pórtico de carga para obtener la altura necesaria y así realizar las experiencias de manera adecuada y segura.

Analizadas las siete primeras pruebas preliminares se procedió a organizar de manera planificada la ejecución de 18 experiencias definitivas desde la prueba # 8 hasta la # 25, las cuales fueron la base del estudio de análisis y conclusiones de este trabajo investigativo.

La organización de las experiencias se realizaron teniendo en cuenta el tipo de apoyo y las separaciones entre cordones de soldadura de los perfiles galvanizados en forma de "C" 100x50x15 calibre 16.

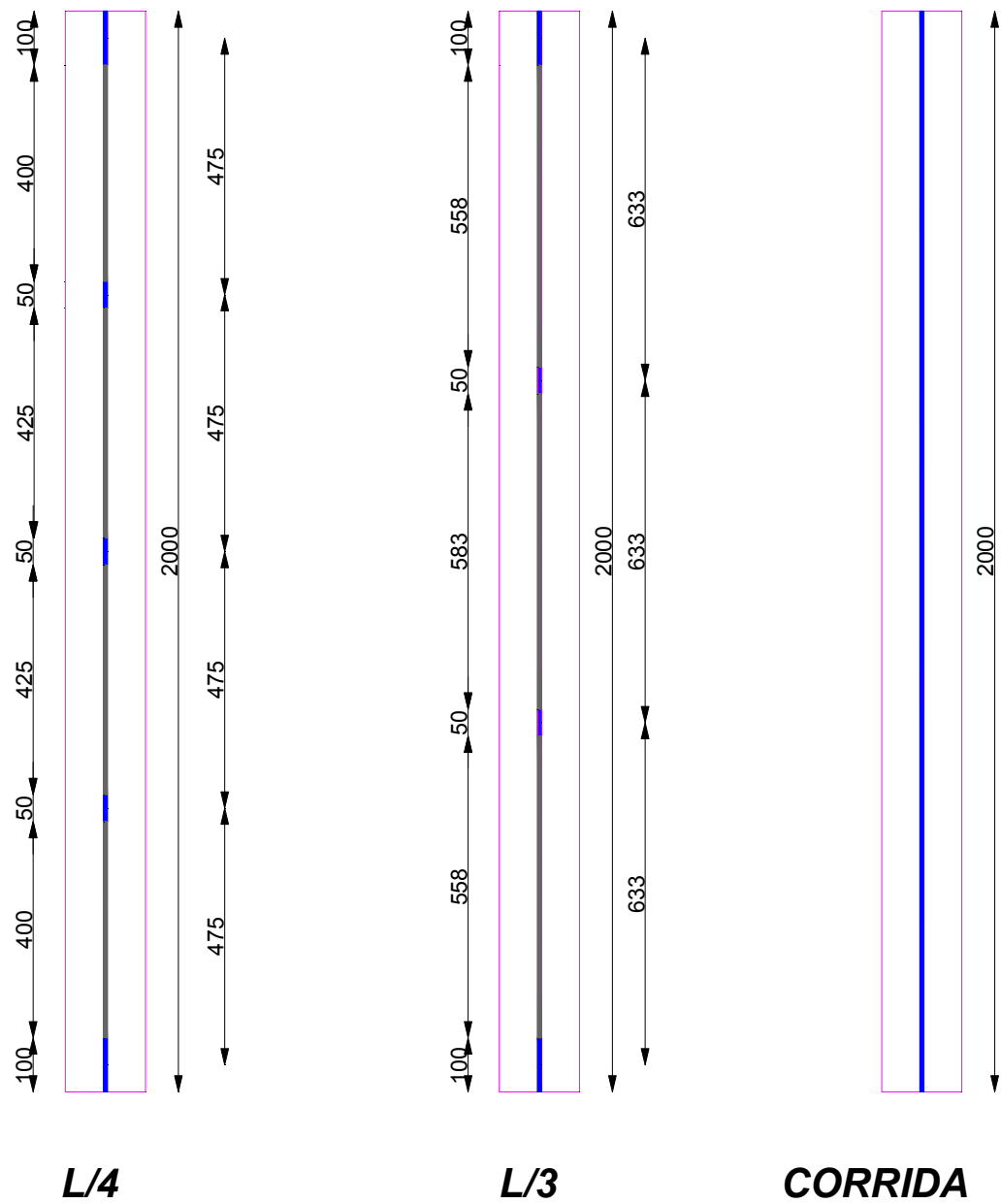
Ilustración 12 Soportes de concreto simple como apoyos para marco de carga.



Para cada condición de apoyo y distancia de separación entre los cordones de soldadura se utilizaron 3 probetas.

Ilustración 13 muestra un esquema de las 3 diferentes distancias de separación entre los cordones de soldadura.

Ilustración 13 Distancias entre cordones de soldaduras (mm)



2.1.1. Sistema de adquisición de datos y control

Para el progreso de esta investigación se utilizaron los equipos de laboratorio del GIEG – Grupo de Investigación en Estructuras y Geotecnia de la Universidad del Norte Barranquilla, entre los que se encuentran transductores potenciométricos de desplazamiento, celdas de carga y galgas de deformación.

Las deformaciones se parametrizaron por medio de clases tipos de transductores de desplazamiento:

- a) Transductor Potenciométrico de Cuerda (*String Potentiometer o String Pot*), Ilustración 14; marca Celesco, modelo PT101. Estos dispositivos entregan un pulso voltaico de salida linealmente proporcional al desplazamiento de un cable de acero inoxidable al cual se encuentra unido. Estos equipos hacen contacto con los perfiles a través de cuerdas de acero que se van acortando o alargando en un tambor a medida que varía su longitud; las medidas tomadas tienen un nivel de precisión de 0.10% del rango máximo (aprox. +/- 0.1 mm). A partir de este momento se les llamará *String Pot*.

Ilustración 14 Transductor Potenciométrico de Cuerda



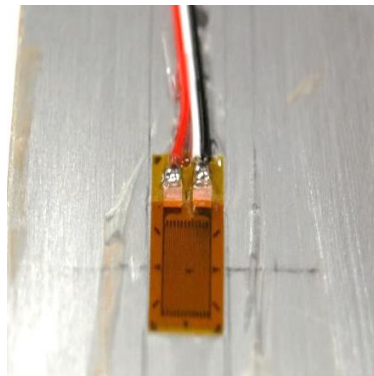
- b) *Transductor de Desplazamiento Potencio métrico (Linear Potentiometer Displacement Transducer-LPTD)*, Ilustración 15, marca *Novotechnik*, modelos TR 25, TR 50 y TR 100. Su función es obtener medidas directas de la posición sin ayuda de algún tipo de acoplamiento sólido adicional, con una precisión de 0.075% del rango máximo (aprox. ± 0.075 mm). A partir de este momento se les llamará *Novotechnik*.

Ilustración 15 Transductor de Desplazamiento Potenciométrico



Para medir las deformaciones unitarias del material en las columnas se utilizaron galgas de deformación o *strain gages*, de marca *VISHAY* y referencia CEA-06-250UW-350. Las galgas funcionan convirtiendo el cambio de resistencia de la galga, producto de su elongación negativa o acortamiento, en deformaciones unitarias localizadas (Ilustración 16).

Ilustración 16 Galgas de deformación



Con la idea de obtener el nivel de carga aplicada a las columnas se empleó una celda de carga, marca Honeywell, modelo TH, capaz de medir cargas en el rango de 66.7 a 889.6 kN, $\pm 0.40\%$ en ensayo de gran escala (Ilustración 17).

Ilustración 17. Celda de carga



Con el fin de obtener la información enviada por los medidores de deformación, de desplazamiento y la celda de carga, se empleó el sistema de adquisición de datos y control del GIEG (Ilustración 18), el cual posee una central de adquisición de datos marca *Pacific Instruments* con capacidad para adquirir y graficar 16 canales. Este sistema de adquisición de datos es capaz de censar hasta diez mil muestras por segundo (10 kS/s) en cada uno de su canales de manera independiente.

Ilustración 18 Sistema de adquisición de datos y control



2.1.2 Instrumentación.

En todas las pruebas definitivas se utilizaron las dos clases de transductores de desplazamientos (*Novotechnik* y *String Pot*) ubicados y organizados según los esquemas de la Ilustración 19 y la Ilustración 20.

Ilustración 19 Vista en planta de ubicación de los transductores de desplazamiento vertical

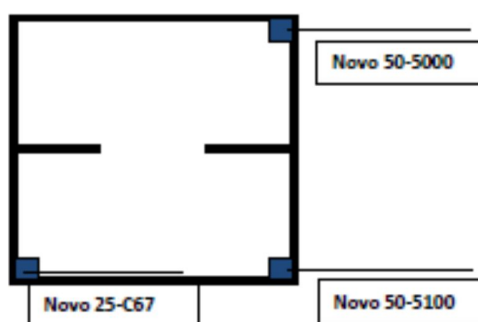
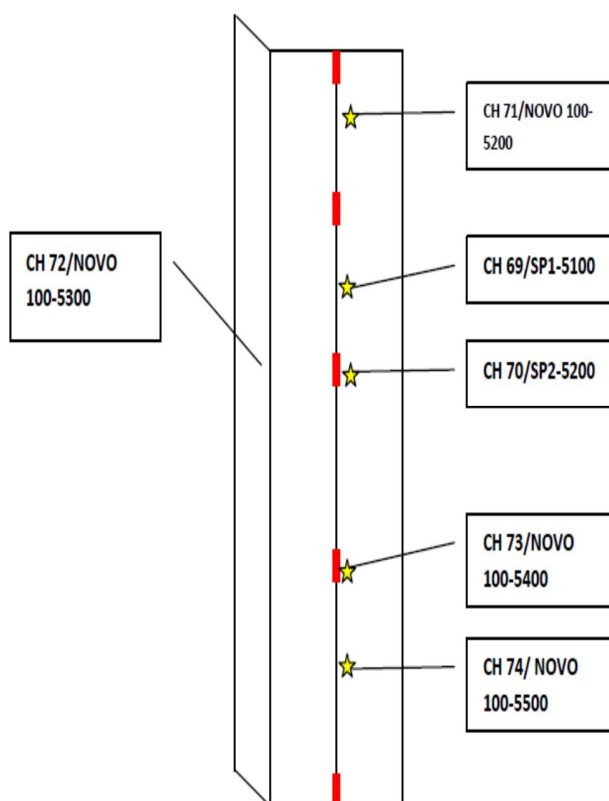
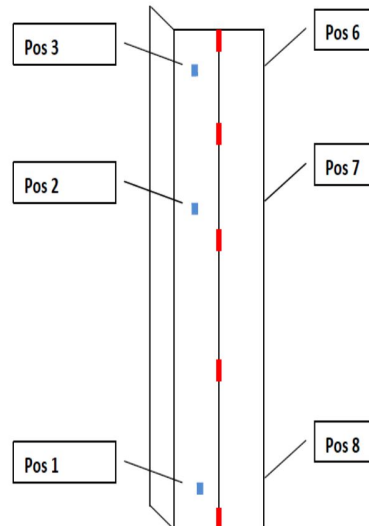


Ilustración 20 Vista frontal de la ubicación de los transductores de desplazamiento horizontal



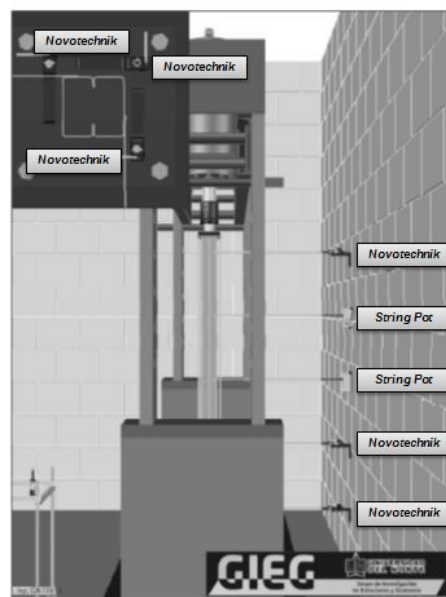
De igual manera el esquema de la Ilustración 21 indica la posición de las galgas que miden la deformación unitaria.

Ilustración 21 Vista frontal de la ubicación de galgas extensiométricas



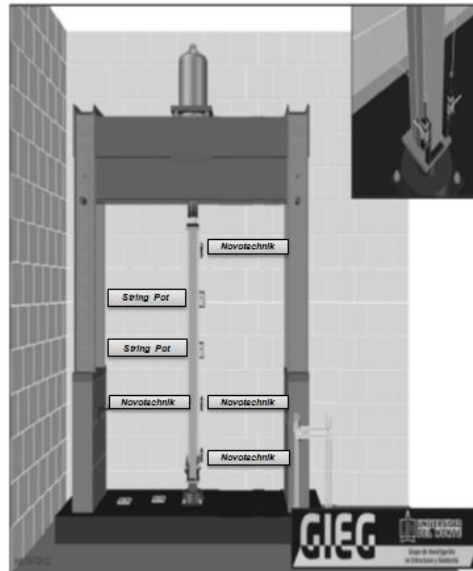
En la Ilustración 22 se observa la ubicación de todos y cada uno de los transductores unidos a los hilos acerados que en la gráfica aparecen de color verde fluorescente.

Ilustración 22 Vista frontal del montaje típico de todas las probetas definitivas ensayadas



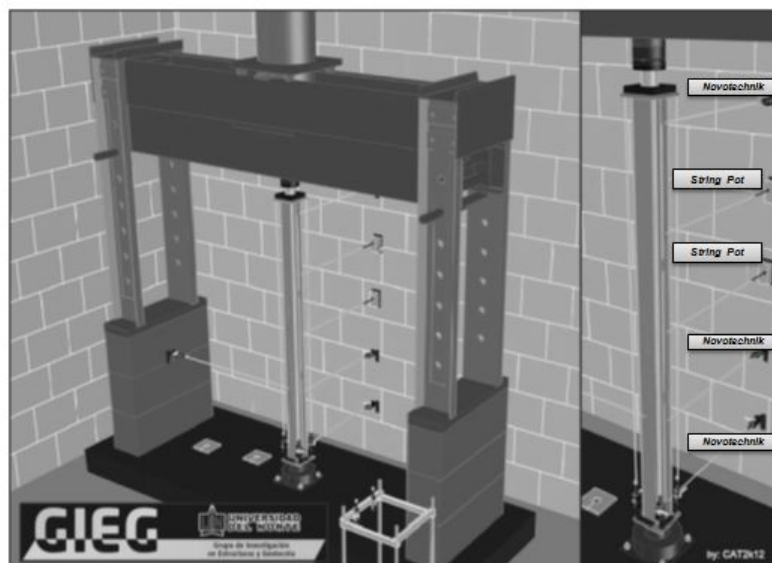
En la Ilustración 23 también se logra apreciar un detalle de la colocación de los *Novotechnik* que se encargan de medir los desplazamientos verticales.

Ilustración 23 Vista lateral del montaje típico de todas las probetas definitivas ensayadas



La Ilustración 24 muestra la situación en la que el apoyo inferior es del tipo articulado o rótula.

Ilustración 24 Perspectiva montaje típico



En total se utilizaron 7 *Novotechnik* y 2 *String Pot* de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2 Cantidad y ubicación de los deformímetros en las probetas

| <i>Deformímetros</i> | <i>Cantidad</i> | <i>Desplazamiento vertical</i> | <i>Desplazamiento Horizontal Sentido X</i> | <i>Desplazamiento Horizontal Sentido Z</i> |
|---------------------------|-----------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <i>Novotechnik 25 mm</i> | 1 | X | | |
| <i>Novotechnik 50 mm</i> | 2 | X | | |
| <i>Novotechnik 100 mm</i> | 1 | | | X |
| <i>Novotechnik 100 mm</i> | 3 | | X | |
| <i>String pot</i> | 2 | | X | |

2.1.3 Condiciones de apoyo.

Como ya se comentó en la introducción de la presente investigación solo se trabajó con base en dos condiciones de apoyo en general, en las cuales el nudo superior siempre se mantuvo articulado, mientras que el apoyo inferior se consideró empotrado o articulado.

En la Ilustración 25 se muestran las diversas condiciones de extremo para carga axial. En ellas se logra identificar el tipo de elástica típica para cada caso en concreto.

Ilustración 25 Longitudes efectivas teóricas de columnas para varias condiciones de apoyo ((McCormac 2012))

| Columna articulada-articulada | Columna empotrada-articulada | Columna empotrada-empotrada | Columna empotrada-libre |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| | | | |
| $L_e = L$ | $L_e = 0.699L$ | $L_e = 0.5L$ | $L_e = 2L$ |
| $K = 1$ | $K = 0.699$ | $K = 0.5$ | $K = 2$ |

Nuestra investigación se enfatizó en los dos primeros casos de la ilustración 25.

2.1.4 Ensayos a compresión con carga axial.

Las 18 experiencias definitivas realizadas se subdividieron en 2 fases conformadas por 9 ensayos cada una. Las primeras 9 pruebas (de la prueba # 8 hasta la prueba # 16 –tener en cuenta que las pruebas # 1 a la # 7 fueron de perfeccionamiento de la práctica experimental-) correspondieron a las que tenían las condiciones de apoyo inferior empotrado y apoyo superior articulado.

Las 9 pruebas restantes (de la prueba # 17 hasta la prueba # 25) hacen referencia a las que tenían como condición de apoyo inferior articulado y apoyo superior articulado.

Las Ilustración 26, Ilustración 27, Ilustración 28, Ilustración 29, Ilustración 30 e Ilustración 31 dan muestra del estado final de cada una de las 18 probetas experimentadas en el marco de carga.

Ilustración 26 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 475mm (L/4) ensayados apoyos empotrado – articulado EA



Prueba #8 EA L/4



Prueba #9 EA L/4



Prueba #10 EA L/4

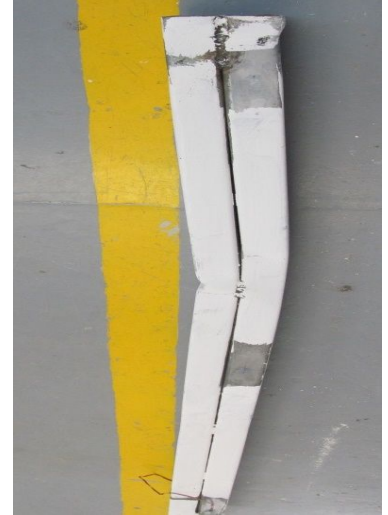
Ilustración 27 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 633mm (L/3) ensayados apoyos empotrado - articulado EA



Prueba #11 EA L/3



Prueba #12 EA L/3

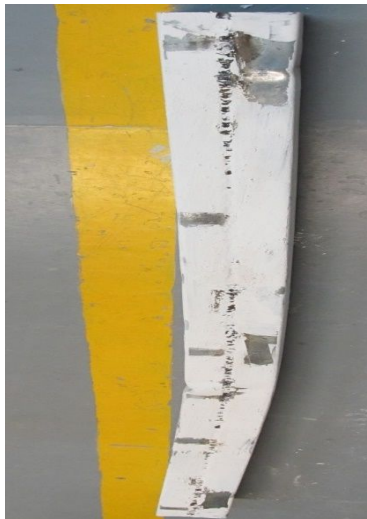


Prueba #13 EA L/3

Ilustración 28 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 0mm (CORRIDA) ensayados apoyos empotrado – articulado EA



Prueba #14 EA Corrida



Prueba #15 EA corrida



Prueba #16 EA corrida

Ilustración 29 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 633mm (L/3) ensayados apoyos articulado – articulado AA



Prueba #17 AA L/3

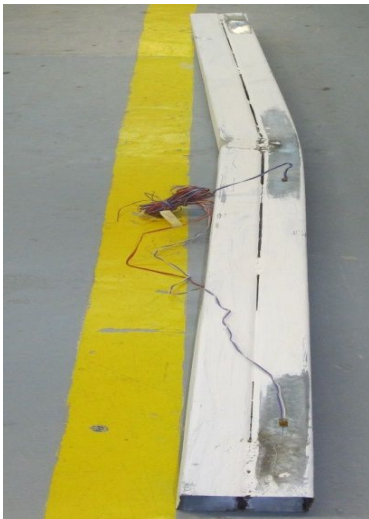


Prueba #18 AA L/3

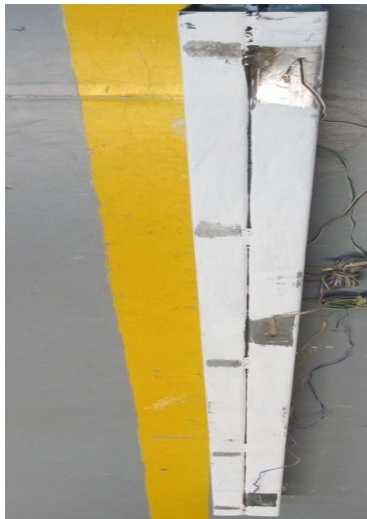


Prueba #24 AA L/3

Ilustración 30 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 475mm (L/4) ensayados apoyos articulado - articulado AA



Prueba #19 AA L/4

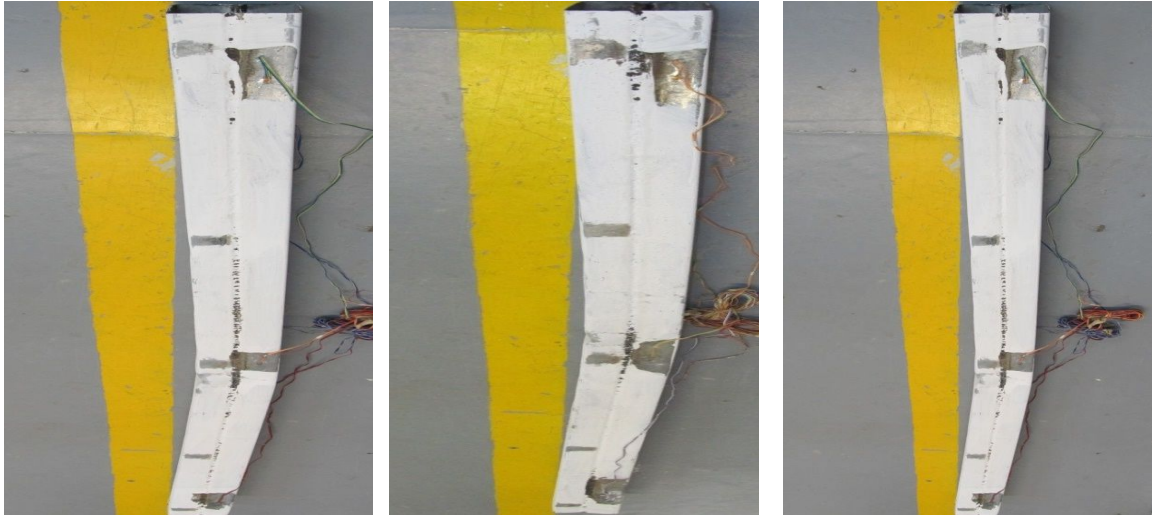


Prueba #22 AA L/4



Prueba #23 AA L/4

Ilustración 31 Perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm con Soldadura @ 0mm (CORRIDA) ensayados apoyos articulado – articulado AA



Prueba #20 AA corrida

Prueba #21 AA corrida

Prueba #25 AA corrida

Para evaluar el comportamiento real de cada una de los especímenes, se midieron los desplazamientos y deformaciones en diferentes puntos de las columnas para cada incremento de carga, hasta finalizar la prueba; esto permitió generar curvas de carga contra desplazamiento (acortamiento), las cuales mostraron una visión más clara del comportamiento de los perfiles en C de acero galvanizado 100x50x15x1.5mm tipo cajón armado.

A través del ensayo se determinó el fenómeno de pandeo elástico (comportamiento físico) para cada una de las probetas ensayadas. Así mismo, se compararon la solución analítica, la modelación con el software COMSOL (COMSOL 2014) y los resultados experimentales.

La Ilustración 32, muestra las curvas obtenidas de carga contra acortamiento para la configuración de soldadura de L/4 (475 mm) en la condición de apoyo empotramiento en el extremo inferior y articulado en el extremo superior. En ella se señalizan los puntos máximos de carga.

Ilustración 32 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/4 (475 mm) con condición de apoyos empotrado – articulado correspondientes a las pruebas # 8, 9 y 10

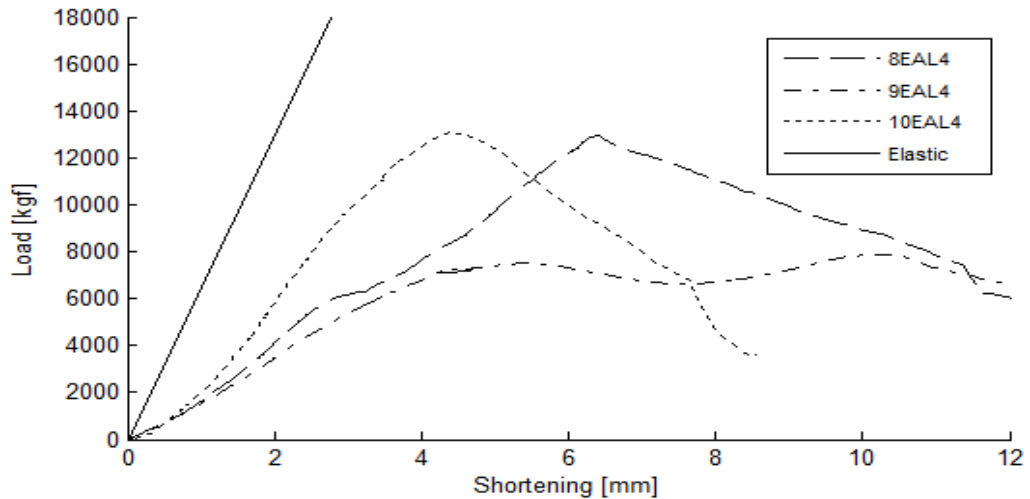
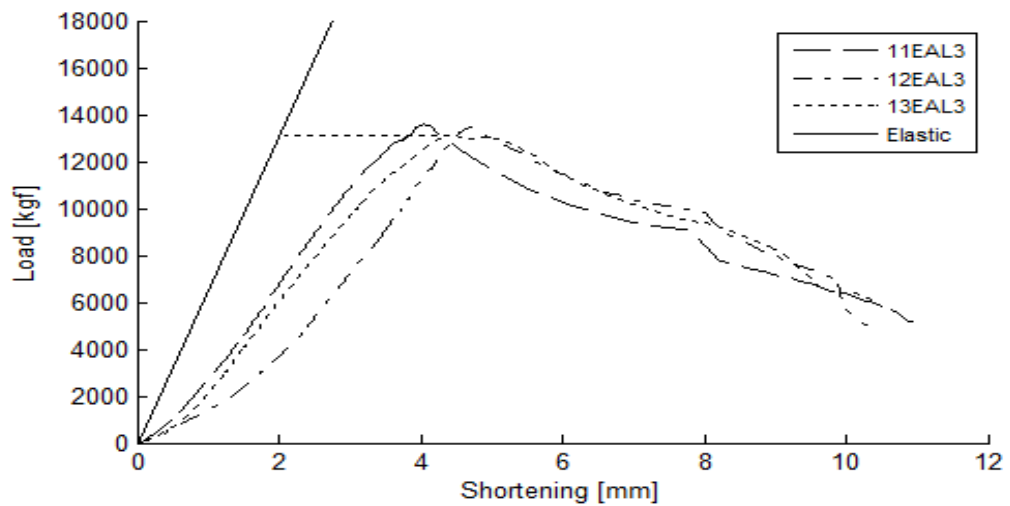


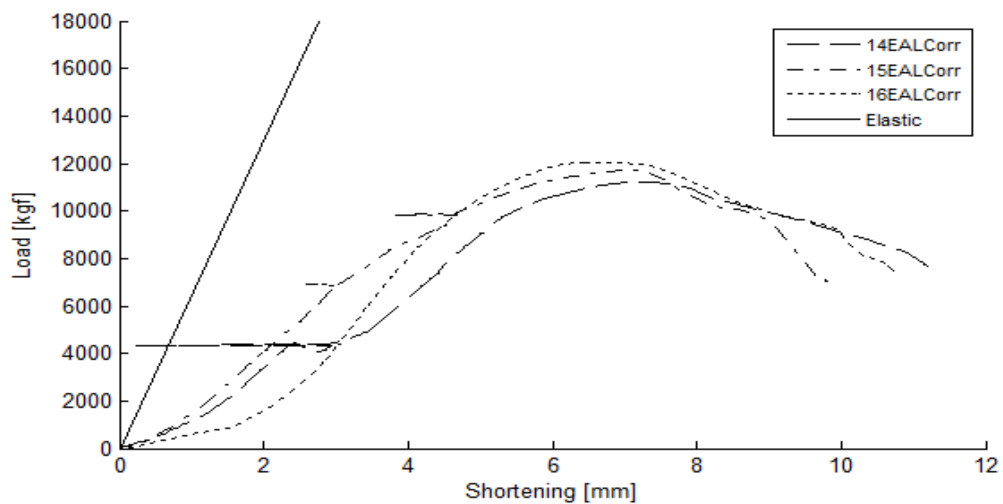
Ilustración 33, muestra las curvas obtenidas de carga contra acortamiento para la configuración de soldadura de L/3 (633 mm) en la condición de apoyo empotramiento en el extremo inferior y articulado en el extremo superior. En ella se localizan los puntos máximos de carga.

Ilustración 33 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/3 (633 mm) con condición de apoyos empotrado – articulado correspondientes a las pruebas # 11, 12 y 13



La Ilustración 34, muestra las curvas obtenidas de carga contra acortamiento para la configuración de soldadura corrida (0 mm) en la condición de apoyo empotramiento en el extremo inferior y articulado en el extremo superior. En ella se aprecian los puntos máximos de carga.

Ilustración 34 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura corrida (0 mm) con condición de apoyos empotrado – articulado correspondientes a las pruebas # 14, 15 y 16

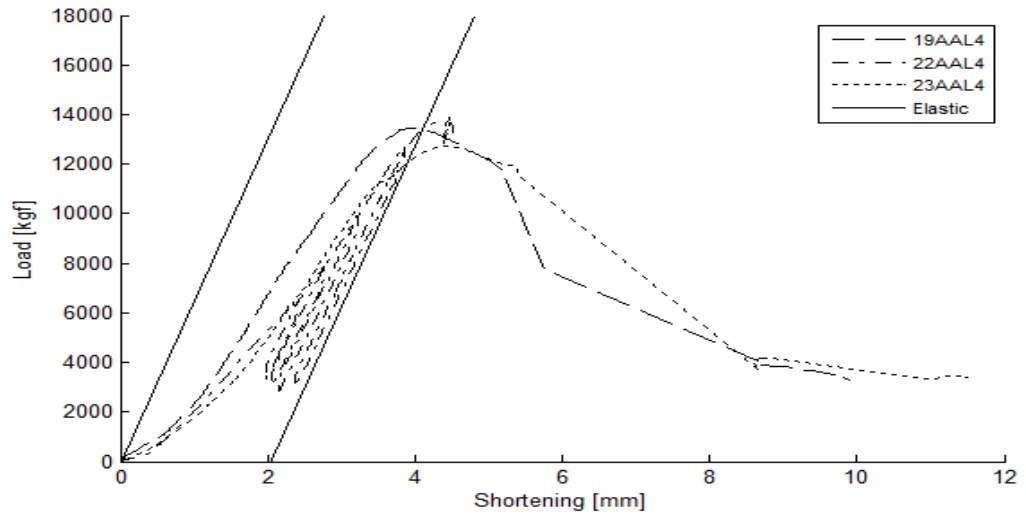


En las experiencias con condiciones de apoyo inferior articulado, las experiencias # 20, 21 y 22 se realizaron procesos de carga y descarga que aparecen evidenciados en la Ilustración 35, Ilustración 37 e Ilustración 38.

La Ilustración 35, muestra las curvas obtenidas de carga contra acortamiento para la configuración de soldadura de L/4 (475 mm) en la condición de apoyo articulado en el extremo inferior y articulado en el extremo superior. En ella se señalizan los puntos máximos de carga.

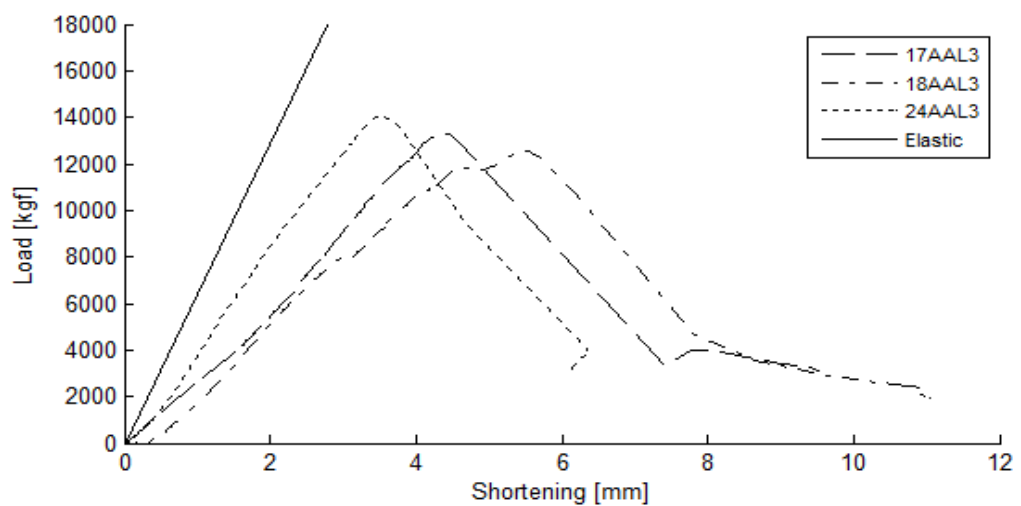
De manera adicional, en la prueba # 22 se realizó un trabajo de carga y descarga donde se pudieron observar varios ciclos de carga realizados.

Ilustración 35 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/4 (475 mm) con condición de apoyos articulado – articulado correspondientes a las pruebas # 19, 22 y 23



La Ilustración 36 muestra las curvas obtenidas de carga contra acortamiento para la configuración de soldadura de L/3 (633 mm) en la condición de apoyo articulado en el extremo inferior y articulado en el extremo superior. En ella se localizan los puntos máximos de carga.

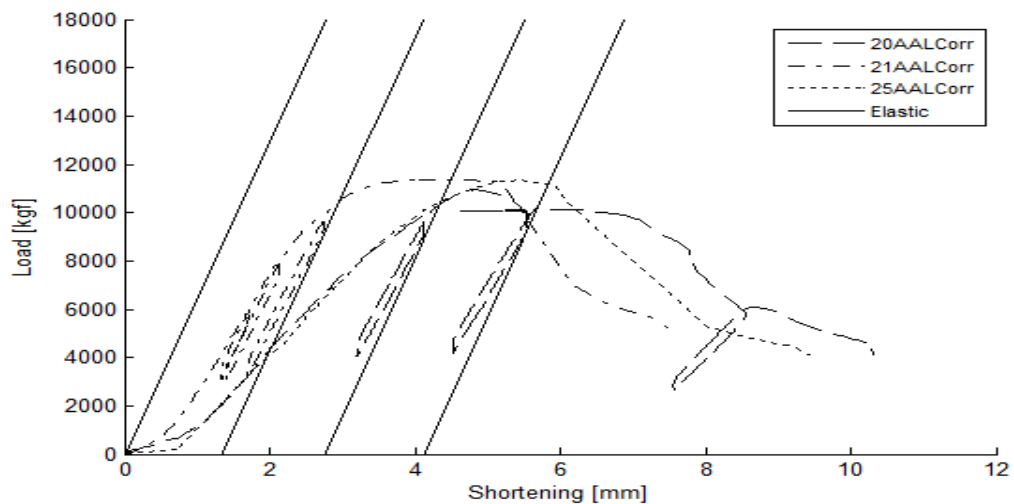
Ilustración 36 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura L/3 (633 mm) con condición de apoyos articulado – articulado correspondientes a las pruebas # 17, 18 y 24



La Ilustración 37, muestra las curvas obtenidas de carga contra acortamiento para la configuración de soldadura corrida (0 mm) en la condición de apoyo articulado en el extremo inferior y articulado en el extremo superior. En ella se aprecian los puntos máximos de carga.

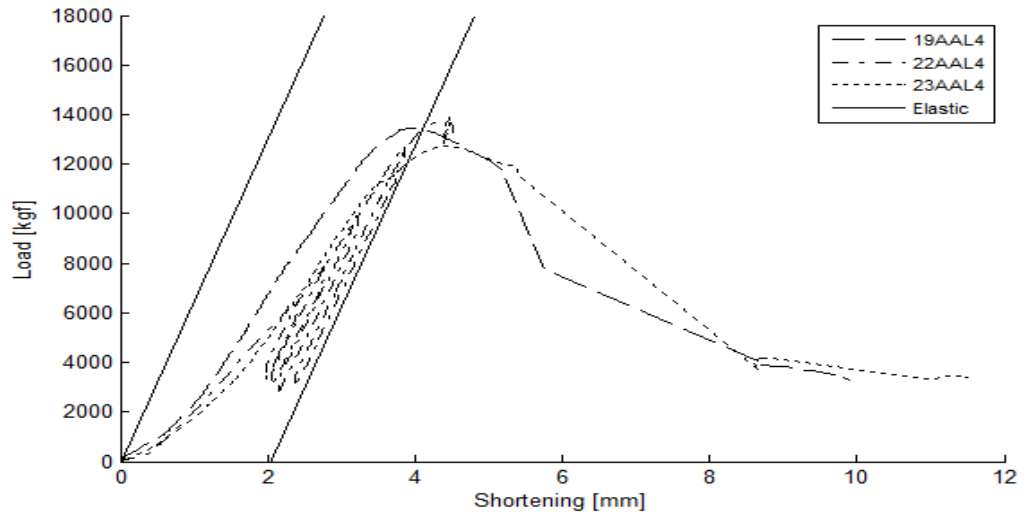
En dicha figura se aprecia la aplicación de un proceso de carga y descarga a las experiencias # 20 y # 21.

Ilustración 37 Curvas de Carga vs Desplazamiento Vertical para la configuración de soldadura corrida (0 mm) con condición de apoyos articulado – articulado correspondientes a las pruebas # 20, 21 y 25



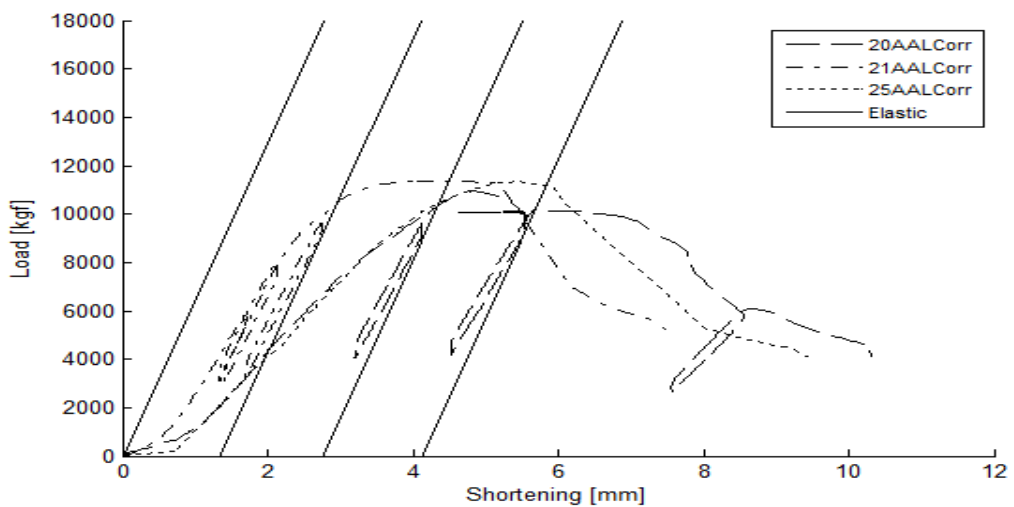
En la Ilustración 38, se superponen la curva de carga contra acortamiento de la prueba # 22 con la recta correspondiente al análisis de carga vs. Acortamiento considerando la recta asociada al comportamiento elástico.

Ilustración 38 Superposición de la curva de carga contra desplazamiento de la prueba # 22 con la recta asociada a la correspondiente del comportamiento elástico



En la Ilustración 39 se superponen las curvas de carga contra desplazamiento de la prueba # 20 y # 21 con las rectas asociadas a las correspondientes del comportamiento elástico.

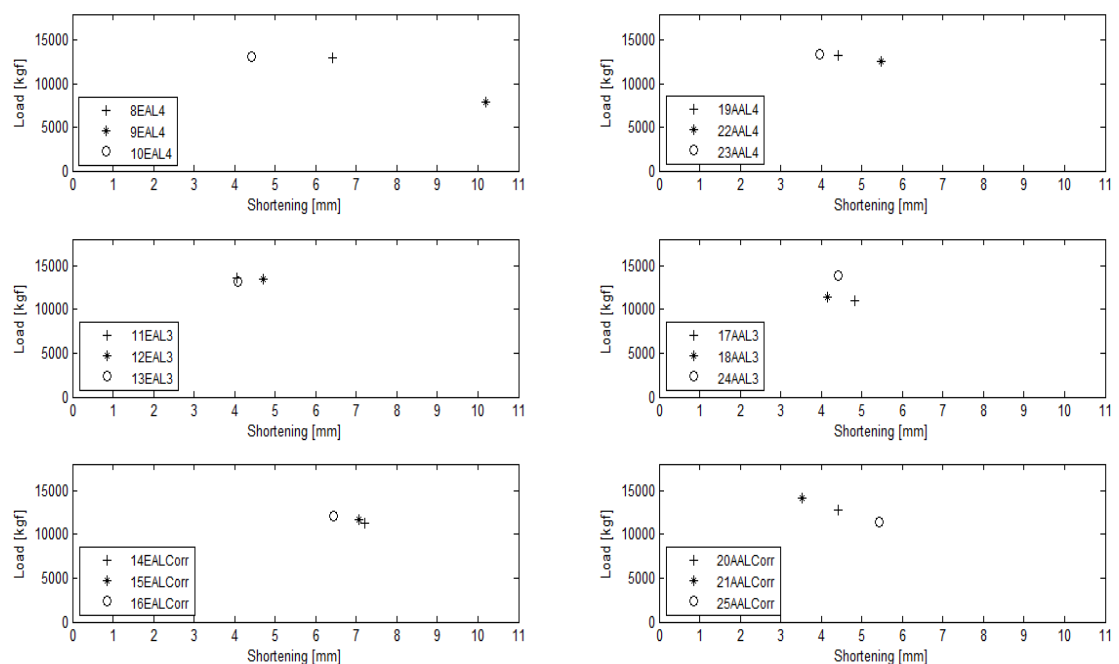
Ilustración 39 Superposición de las curvas de carga contra desplazamiento de las pruebas # 20 y # 21 con las rectas de sus elásticas respectivas



Como se pudo observar, los valores de carga máxima varían para cada configuración de soldadura y para cada condición de apoyo.

En la ilustración 40 se aprecian los valores de carga máxima contra acortamiento para las distintas configuraciones de cordones y condiciones de apoyo.

Ilustración 40 Valores de carga máxima para cada configuración de soldadura y para cada condición de apoyo



Con el propósito de establecer de una forma más clara los esfuerzos durante el proceso de carga y en el momento de la falla, se midieron por medio de galgas de deformación las deformaciones unitarias a lo largo del espécimen, localizadas de acuerdo a la Ilustración 21, donde se muestra la ubicación de las galgas de deformación en el perfil para cada una de las probetas ensayadas.

En las Ilustración 41, Ilustración 42 e Ilustración 43 aparecen referenciadas los resultados aportados por los transductores horizontales y las galgas de deformación.

Ilustración 41 Deformación unitaria promedio al 95% de la carga máxima EA L/4

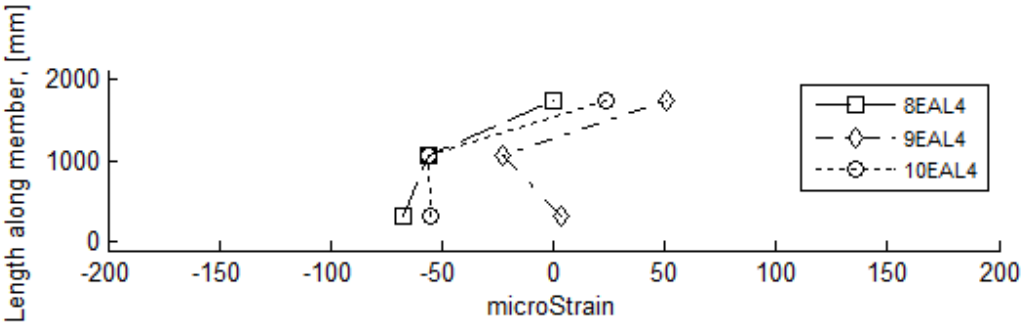


Ilustración 42 Deformación unitaria promedio al 95% de la carga máxima EA L/3

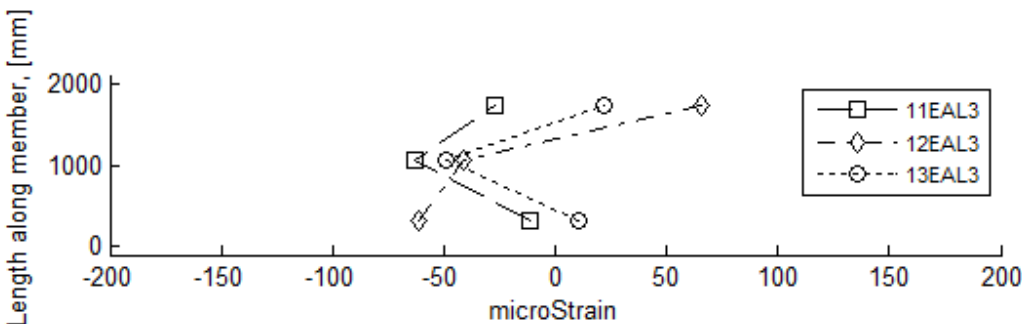
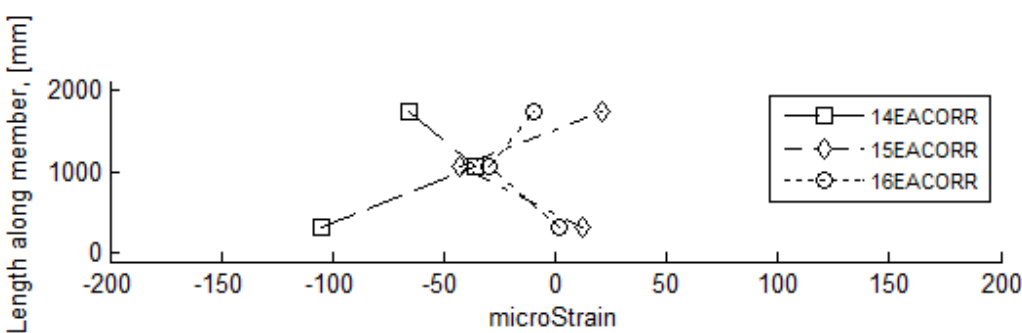
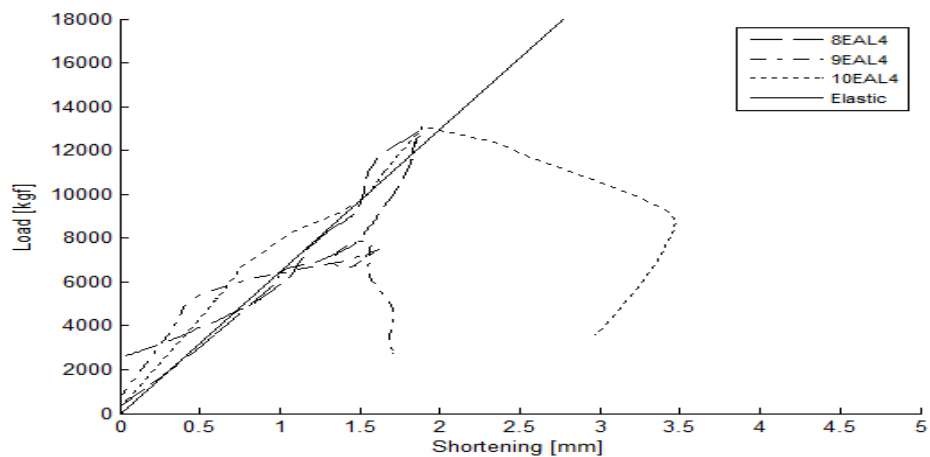


Ilustración 43 Deformación unitaria promedio al 95% de la carga máxima EA Corrido



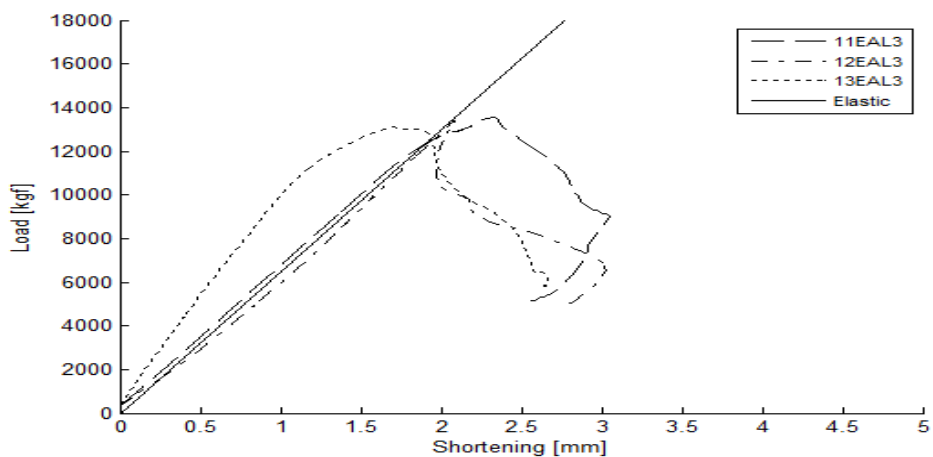
La Ilustración 44, presenta las curvas integradas del promedio de las 6 galgas de deformación visualizando la carga contra el acortamiento vertical para la configuración de soldadura @L/4 (475 mm) con apoyo inferior empotrado y el superior articulado correspondiente a las pruebas #8, #9 y #10.

Ilustración 44 Deformación promedio de las 6 galgas con la configuración de soldadura @L/4 (475 mm) apoyos empotrado-articulado



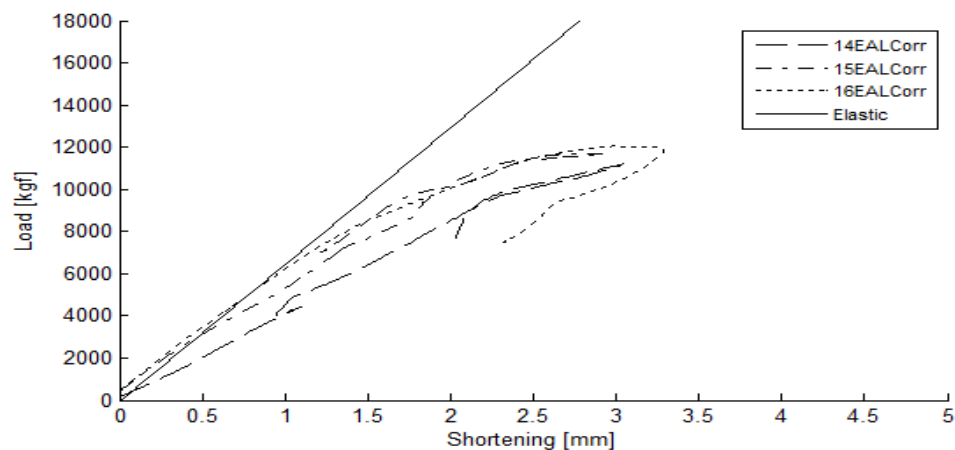
La Ilustración 45, presenta las curvas integradas del promedio de las 6 galgas de deformación visualizando la carga contra el acortamiento vertical para la configuración de soldadura @L/3 (633 mm) con apoyo inferior empotrado y el superior articulado correspondiente a las pruebas #11, #12 y #13.

Ilustración 45 Deformación promedio de las 6 galgas con la configuración de soldadura @L/3 (633 mm) apoyos empotrado-articulado



La Ilustración 46, presenta las curvas integradas del promedio de las 6 galgas de deformación visualizando la carga contra el acortamiento vertical para la configuración de soldadura @CORRIDA (0 mm) con apoyo inferior empotrado y el superior articulado correspondiente a las pruebas #14, #15 y #16.

Ilustración 46 Deformación promedio de las 6 galgas con la configuración de soldadura @CORRIDA (0 mm) apoyos empotrado-articulado



2.2 Fase analítica

2.2.1 Estimación de las relaciones de esbeltez.

La relación de esbeltez según el NSR-10 para miembros en sección cajón, formados a partir de dos secciones C de lámina formada en frío en contacto a través de sus pestañas o labios rigidizadores y unidas por cordones intermitentes de soldadura se encuentra definida de acuerdo a la Ecuación 10 o a la Ecuación 11.

Ecuación 10. Relación de esbeltez modificada caso 1.

$$\text{Sí } \left(\frac{a}{r_i} > 50 \right); \left(\frac{KL}{r} \right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r} \right)^2 + \left(\frac{a}{r_i} - 50 \right)^2}$$

Ecuación 11. Relación de esbeltez modificada caso 2.

$$\text{Si } \left(\frac{a}{r_i} \leq 50 \right); \left(\frac{KL}{r} \right)_m = \left(\frac{KL}{r} \right)_0$$

Dónde:

$\left(\frac{KL}{r} \right)_0$ = Relación de esbeltez total de la sección completa alrededor del eje del miembro armado.

a = Espaciamiento del sujetador intermedio, punto o cordón de soldadura.

r_i = Radio de giro mínimo del área transversal total no reducida de una sección individual en un miembro armado.

Todas las variables se definen y limitan en la sección F.4.4.1.2 de la NSR-10. El valor de a no debe exceder los 300 mm de acuerdo a las indicaciones del NSR-10.

Precisamente es en esta limitante en la que se basa la presente investigación, pues interesa conocer el comportamiento de la sección cajón conformada a partir de dos secciones en C con acero formado en frío con una longitud entre cordones de soldadura mayores a 300 mm debido a que en la práctica constructiva se utiliza la disminución del número de cordones de soldadura a lo largo del elemento.

Se procede a determinar el factor (a/r_i) para cada una de las tres configuraciones de soldadura (Tabla 3).

Tabla 3 Determinación del factor (a/r_i) para cada una de las longitudes de espaciamento

| a [mm] | r_i [mm] X | r_i [mm] Y | $(a/r_i)_X$ | $(a/r_i)_Y$ |
|----------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 475 | 39.919 | 18.597 | 11.899 | 25.542 |
| 633 | 39.919 | 18.597 | 15.857 | 34.038 |
| 0 | 39.919 | 18.597 | 0 | 0 |

Los resultados obtenidos indican que se debe aplicar el caso 2 para todas las longitudes de espaciamiento pues todas estas son menores que 50.

En síntesis, la relación de esbeltez será $(KL/r)_0$, es decir la total, la que corresponde a la sección completa alrededor del eje del miembro armado según el NSR-10.

2.2.2 Estimación del mínimo esfuerzo de pandeo flector elástico, de pandeo torsional y de pandeo flexo torsional.

Para secciones de este tipo con simetría doble, el esfuerzo de pandeo flector elástico F_e se define de acuerdo a la Ecuación 12. Esfuerzo de pandeo flector elástico, F_e

Ecuación 12. Esfuerzo de pandeo flector elástico, F_e

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{KL}{r} \right)_m^2} \right)$$

Dónde

E = módulo de elasticidad de acero (200000 MPa).

K = factor de longitud efectiva.

KL = longitud no arriostrada lateralmente del miembro = 2000 mm

r = radio de giro de la sección transversal completa no reducida alrededor del eje de pandeo.

De acuerdo a las diversas condiciones de apoyo y a las distintas longitudes de separación de los cordones de soldadura se presenta la Tabla 4 para la evaluación del pandeo flector elástico.

Tabla 4 Determinación de esfuerzo de pandeo elástico

| a [mm] | Apoyos | $K_{diseño}$ | $\left(\frac{KL}{r}\right)_X$ | $\left(\frac{KL}{r}\right)_Y$ | F_{e_x} [MPa] | F_{e_y} [MPa] |
|----------|---------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| 475 | ARTICULADO- ARTICULADO | 1 | 50.10 | 52.88 | 786 | 706 |
| 475 | EMPOTRADO - ARTICULADO | 0.8 | 40.08 | 42.31 | 1229 | 1103 |
| 633 | ARTICULADO- ARTICULADO | 1 | 50.10 | 52.88 | 786 | 706 |
| 633 | EMPOTRADO - ARTICULADO | 0.8 | 40.08 | 42.31 | 1229 | 1103 |

2.2.3 Estimación de la resistencia nominal para carga concentrada

A continuación se obtienen los valores de la resistencia nominal para carga concentrada asumiendo un $\phi = 0.85$. A partir de la Ecuación 4 y de la Ecuación 6 se presentan los resultados de la Tabla 5.

Tabla 5 Estimación de la resistencia nominal para carga concentrada

| a [mm] | Apoyos | λ_{cX} | λ_{cY} | F_{nX} | F_{nY} | A_e [mm ²] | P_{nX} [kN] | P_{nY} [kN] |
|----------|---------------------------|----------------|----------------|----------|----------|--------------------------|---------------|---------------|
| 475 | ARTICULADO- ARTICULADO | 0.667 | 0.704 | 290.515 | 284.403 | 642.38 | 161.76 | 158.35 |
| 475 | EMPOTRADO - ARTICULADO | 0.534 | 0.563 | 310.665 | 306.466 | 642.38 | 172.97 | 170.64 |
| 633 | ARTICULADO- ARTICULADO | 0.667 | 0.704 | 290.515 | 284.403 | 642.38 | 161.76 | 158.35 |
| 633 | EMPOTRADO - ARTICULADO | 0.534 | 0.563 | 310.665 | 306.466 | 642.38 | 172.97 | 170.64 |

2.2.4 Estimación de la relación carga-desplazamiento: modelo de pandeo lineal en COMSOL®.

Comsol es un programa computacional de elementos finitos, que implementa ecuaciones diferenciales que rigen los fenómenos físicos y por ende el comportamiento de cada elemento, y los resuelve simultáneamente conduciendo a una explicación comprensible de cómo el sistema funciona como un todo.

Comsol es usado principalmente para el diseño, optimización, estudio e investigación de sistemas con un avanzado nivel de complejidad.

Los sistemas usados en la investigación presentan niveles de complejidad considerables gracias a sus propiedades de geometría, escala y al acoplamiento de las ecuaciones diferenciales gobernantes.

La modelación en Comsol usa pasos comunes en cualquier análisis de elemento finito (pre-proceso, proceso y post proceso) y requiere ciertas definiciones como lo son el modelo físico, las propiedades físico-químicas y mecánicas de los materiales, las condiciones iniciales y de frontera y un dominio para la solución.

Se realizaron 6 modelos distintos en Comsol donde se varió la longitud entre cordones de soldadura (633 mm, 475 mm u corrido), y las dos condiciones de apoyo (articulado-articulado y empotrado-articulado). En ellos se estableció el valor del factor de análisis de pandeo lineal del elemento.

Inmersos en el programa Comsol, se importó una configuración geométrica realizada en un software de dibujo asistido por computador CAD (CAD import module kernel con una tolerancia de 1×10^{-6} y reconstrucción automática), la cual fue importada junto con las dimensiones de los perfiles reales.

Teniendo la geometría en 3D se procedió a darle las características de material al modelo mediante la selección del *Structural steel*, cuyas propiedades mecánicas

tales como densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, entre otras, fueron indicadas dentro del modelo.

Una vez definidos material y geometría nos adentramos al tema de mecánica de sólidos donde definimos los dos tipos de estudios a realizar (estacionario y pandeo lineal) para un material elástico lineal.

Posteriormente se argumentó los tipos de restricciones a colocar las cuales fueron fijas y articuladas dependiendo del caso, teniendo en cuenta que fueron establecidas en el área de la sección transversal del elemento.

Luego se estableció una carga unitaria en la parte superior del elemento para que la magnitud del factor de carga crítica coincidiera con la de la magnitud de la carga de pandeo.

Por último se estipuló un mallado fino a toda la geometría controlado por la física del elemento.

La, Ilustración 47, Ilustración 48, Ilustración 49, Ilustración 50, Ilustración 51, e Ilustración 52, muestran el resultado de la modelación del pandeo lineal junto con el valor del factor de carga crítica para el análisis de pandeo y la magnitud del desplazamiento vertical obtenido

Ilustración 47 COMSOL Articulado-articulado corrido

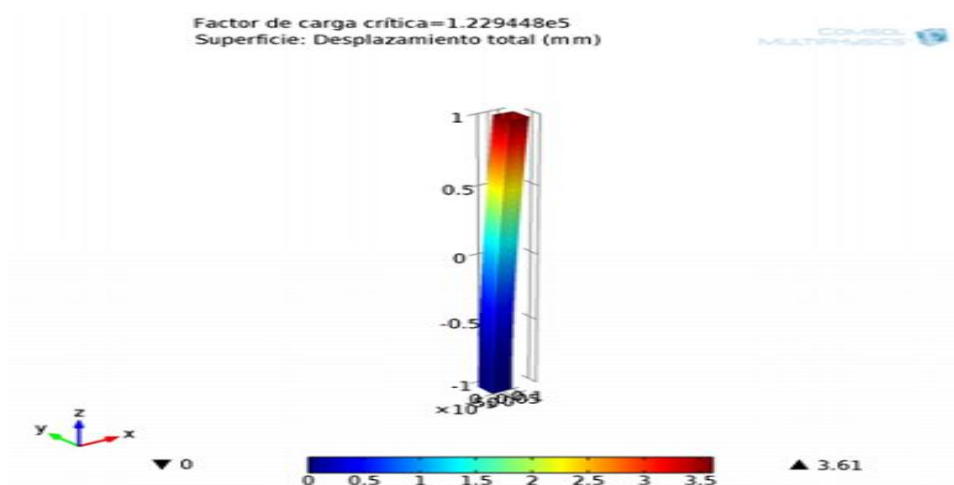


Ilustración 48 COMSOL Articulado-articulado a=475mm

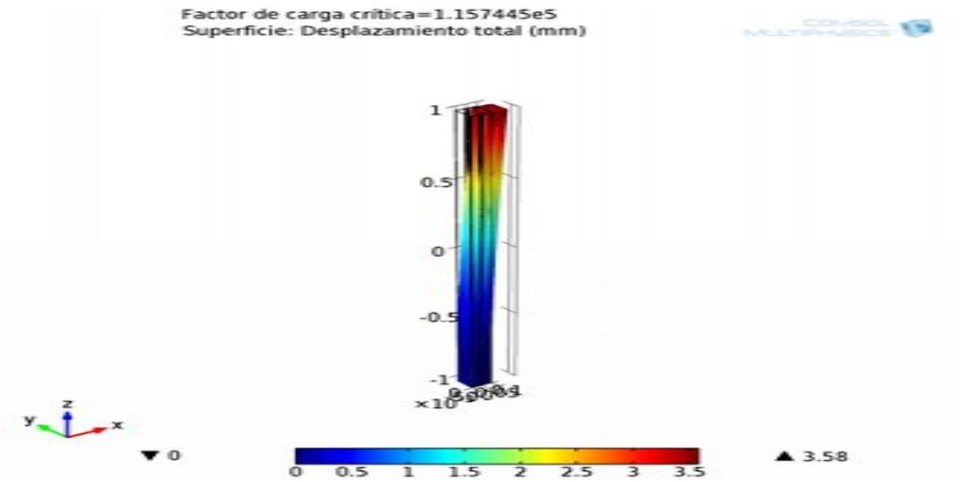


Ilustración 49 COMSOL Articulado-articulado a=633mm

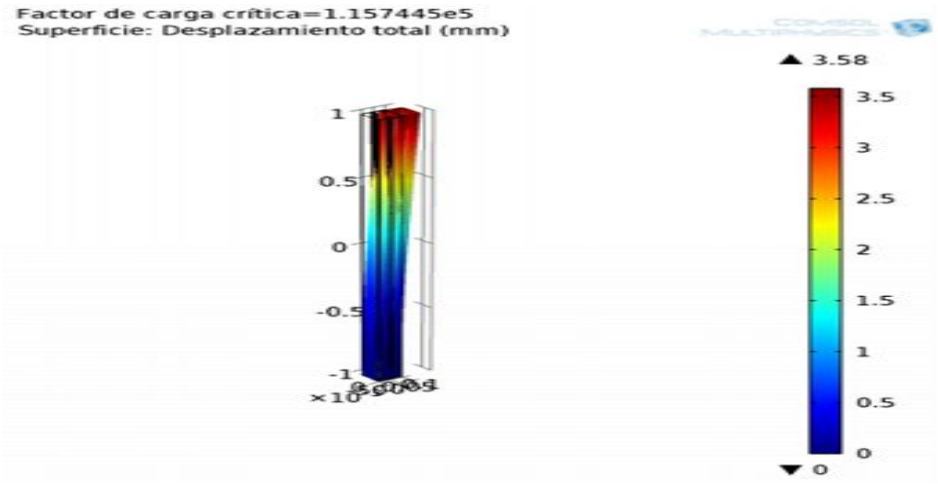


Ilustración 50 COMSOL Empotrado-articulado corrido

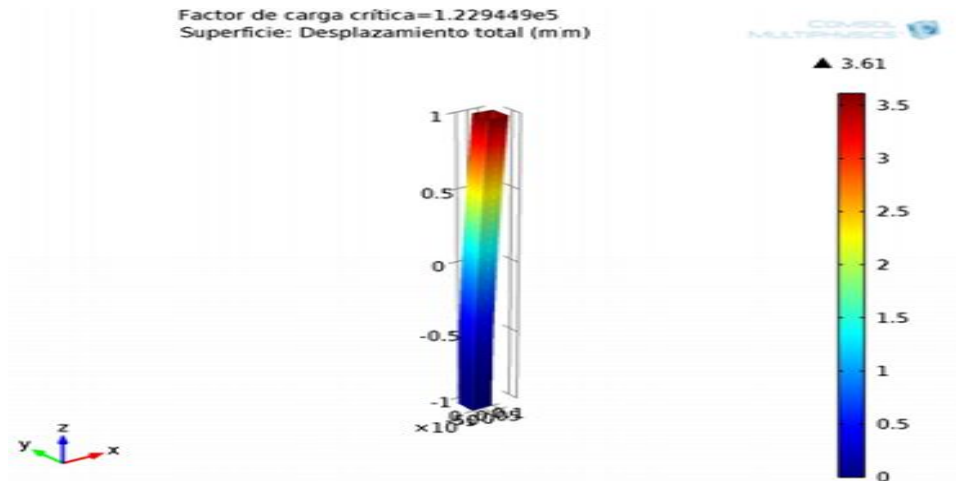


Ilustración 51 COMSOL Empotrado-articulado $a=475\text{mm}$

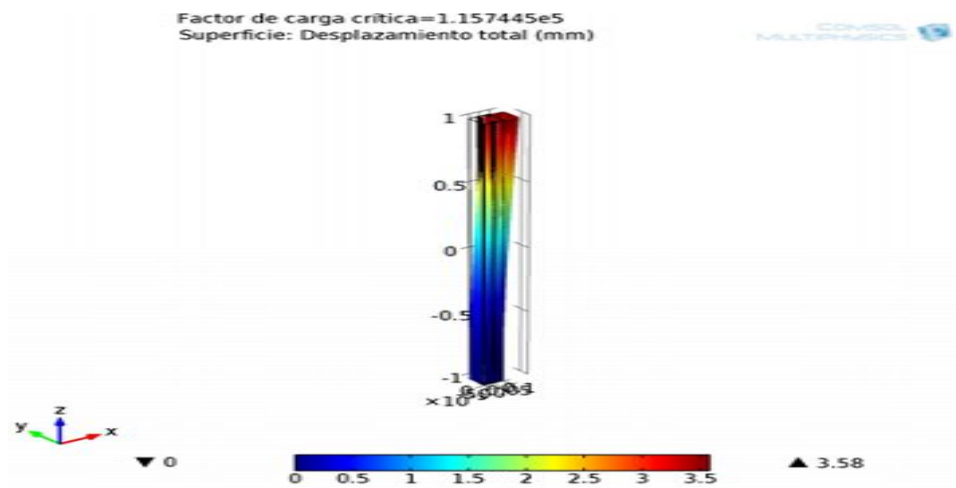
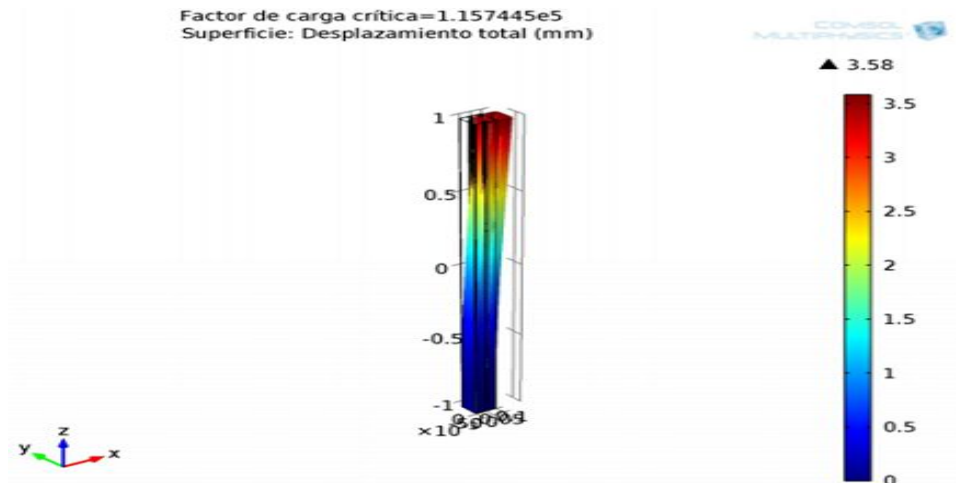


Ilustración 52 COMSOL Empotrado-articulado $a=633\text{mm}$



Obsérvese que los valores obtenidos para los factores de carga crítica en cada una de los modelos de COMSOL, muestran magnitudes similares, lo que hace referencia en que la variable de separación y condición de apoyo no fue tan determinante en los resultados de la modelación en la evaluación del pandeo global.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Con la finalidad de determinar cuál de las separaciones del cordón de soldadura usadas en la investigación presenta mejor resultado en cuanto a la capacidad de carga axial concéntrica de los perfiles en C de acero galvanizado, se realizaron diferentes análisis a los resultados obtenidos en el laboratorio y la modelación computacional y se compararon con los resultados teóricos esperados mediante unas gráficas de carga vs relación de esbeltez.

En la Ilustración 53, Ilustración 54, Ilustración 55, Ilustración 56, Ilustración 57, e Ilustración 58, se observan el valor de la carga obtenida para cada condición de apoyo y separación de soldadura usando la parte teórica del reglamento NSR-10 (línea continua), el software CFS (línea discontinua), COMSOL (triángulo) y el resultado experimental (cuadrado).

Ilustración 53 Articulado-articulado $a=0mm$

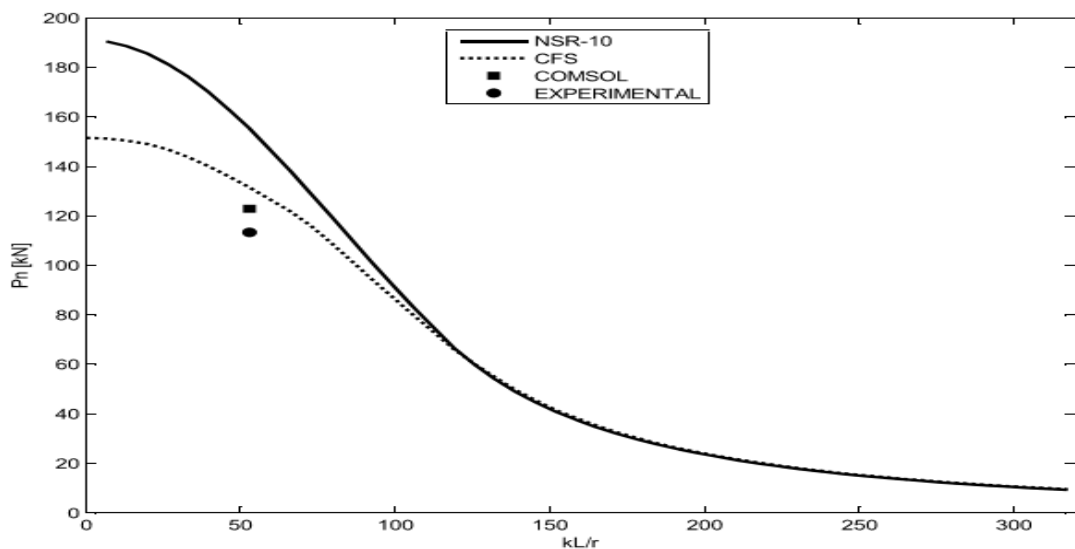


Ilustración 54 Articulado-articulado $a=475\text{ mm}$

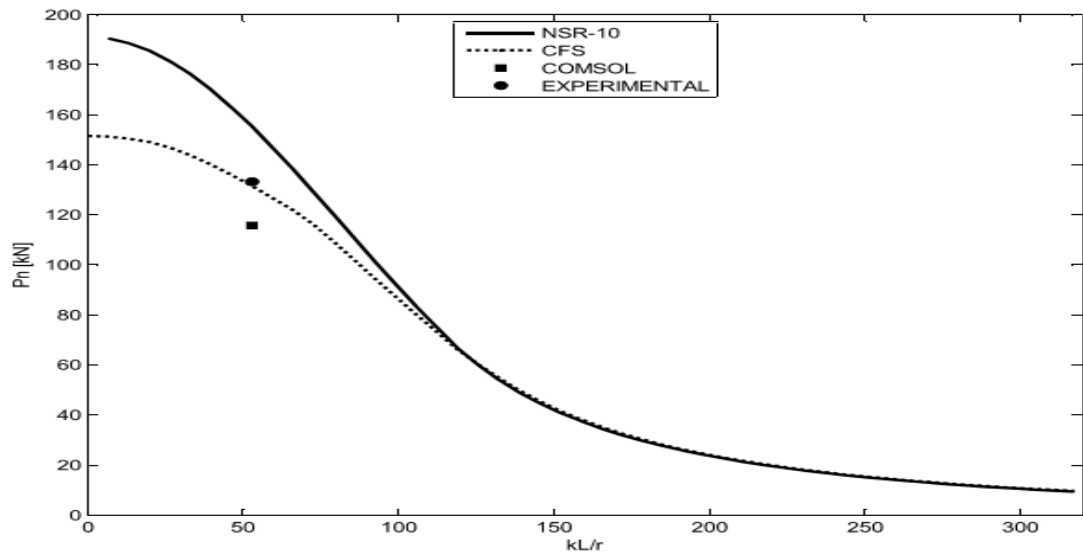


Ilustración 55 Articulado-articulado $a=633\text{ mm}$

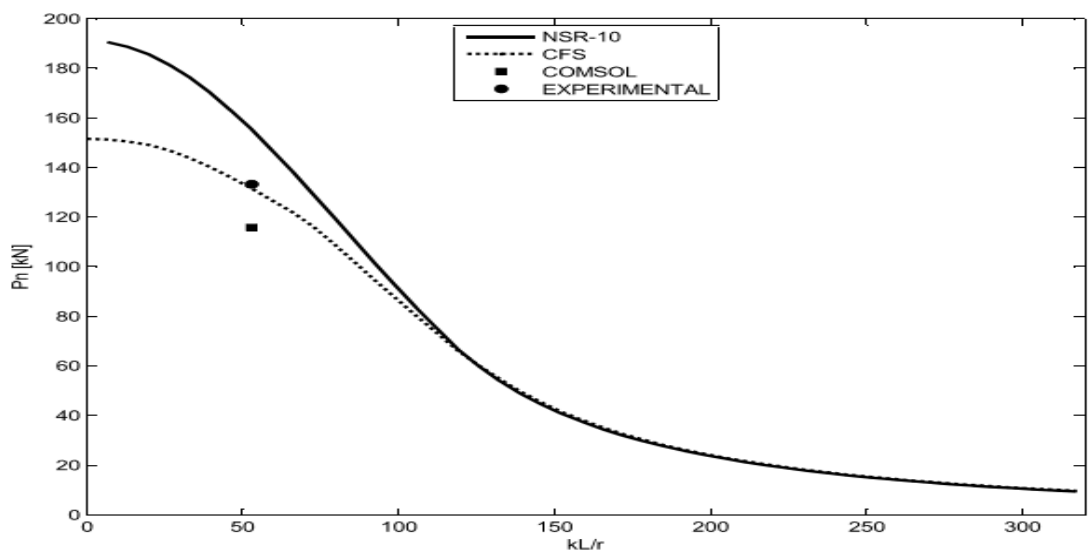


Ilustración 56 Empotrado-articulado $a=0\text{mm}$

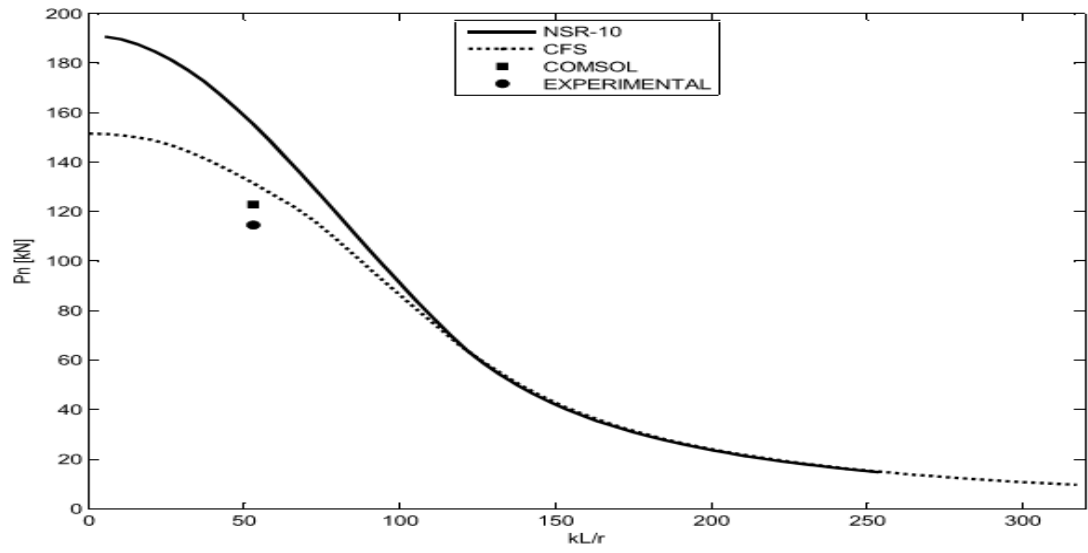


Ilustración 57 Empotrado-articulado $a=475\text{mm}$

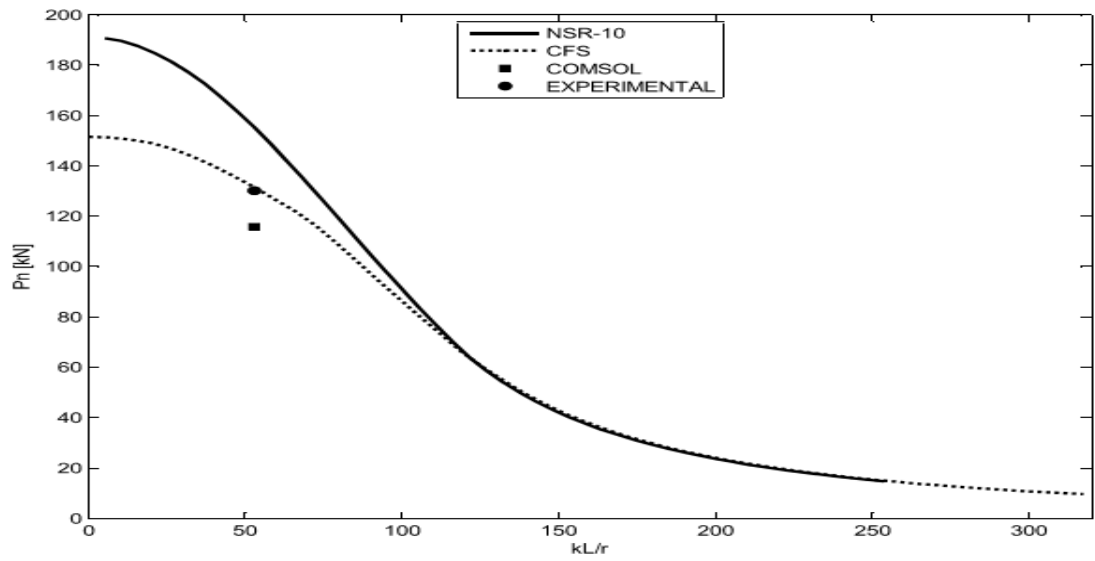
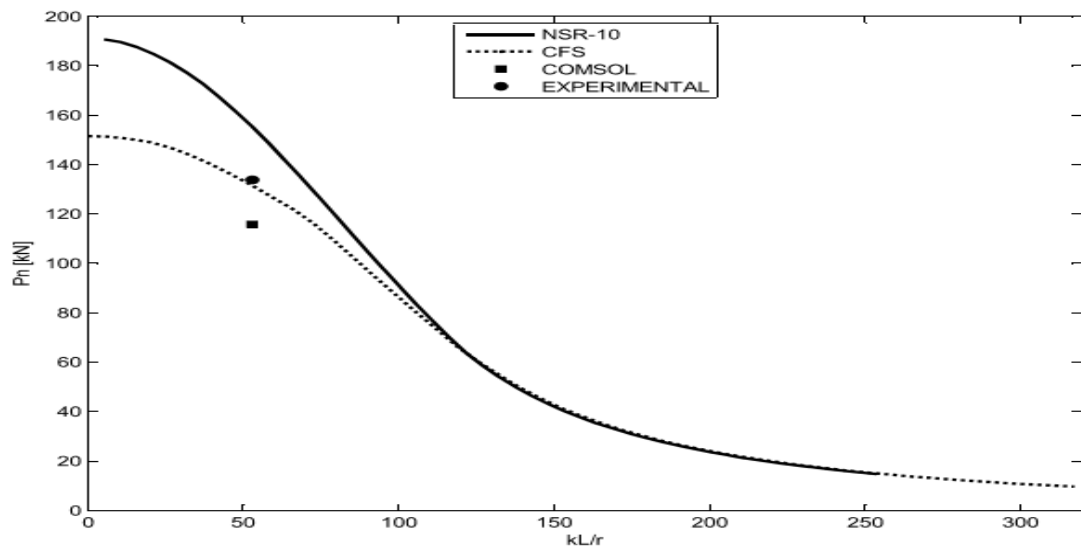


Ilustración 58 Empotrado-articulado $a=633\text{mm}$



En la Tabla 6 se resumen los valores promedios de la carga axial concéntrica de los especímenes evaluados (3 probetas para cada caso) mediante las experiencias en el laboratorio, el software CFS, la modelación en COMSOL (modos de pandeo) y el valor teórico que propone el NSR-10.

Tabla 6 Valores de carga axial concéntrica para cada método usado

| a (mm) | Apoyo | P_n NSR-10 [kN] | P_n CFS [kN] | P_n COMSOL [kN] | P_n Experimental [kN] |
|----------|-------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------------|
| 0 | A-A | 155.29 | 131.44 | 112.95 | 113.3 |
| 475 | A-A | 155.29 | 131.44 | 115.75 | 133.2 |
| 633 | A-A | 155.29 | 131.44 | 115.75 | 133.3 |
| 0 | A-E | 167.39 | 131.44 | 122.94 | 114.6 |
| 475 | A-E | 167.34 | 131.44 | 115.75 | 130.1 |
| 633 | A-E | 167.34 | 131.44 | 115.75 | 133.8 |

A-A: Articulado – Articulado
A-E: Articulado – Empotrado

Al comparar dichos valores entre ellos se observa que los valores que arrojan la evaluación teórica según la norma colombiana y los utilizados por CFS exceden en un alto porcentaje los valores experimentales.

Mientras que los datos obtenidos por el programa de elementos finitos Comsol son más aterrizados a los valores obtenidos en las experiencias en el laboratorio con excepción de los especímenes unidos por cordones continuos de soldadura ($a = 0$ mm), los resultados que arroja el reglamento NSR-10 son muy elevados con respecto a los obtenidos experimentalmente.

En investigaciones futuras sería interesante tener en cuenta la no linealidad del material y de la geometría de la sección geométrica, condiciones que no se implementaron en la modelación pues no entran en el alcance de esta investigación (modelación no lineal). Teniendo en cuenta estos dos factores se podría tener más certeza del comportamiento global de estos elementos compuestos bajo carga axial concéntrica.

3.1 Comparación de los resultados experimentales vs teóricos y computacionales.

En la Tabla 7 se aprecia claramente que la capacidad analítica de acuerdo al NSR-10 tienen un incremento respecto a los valores experimentales desde un 16.5% hasta un 46% dependiendo de la separación de los cordones de la soldadura.

Por otro lado, los software CFS Y COMSOL muestran valores muy cercanos a los experimentales con excepción del caso con cordón continuo de soldadura.

Tabla 7 Porcentaje de carga analítica con respecto al valor de carga experimental

| a (mm) | Apoyo | Pn NSR-10 / Pn Experimental | Pn CFS / Pn Experimental | Pn COMSOL / Pn Experimental |
|--------|-------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 0 | A-A | 137.06% | 116.01% | 99.69% |
| 475 | A-A | 116.58% | 98.68% | 86.90% |
| 633 | A-A | 116.50% | 98.60% | 86.83% |
| 0 | A-E | 146.06% | 114.69% | 107.28% |
| 475 | A-E | 128.62% | 101.03% | 88.97% |
| 633 | A-E | 125.07% | 98.24% | 86.51% |

4. ECUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO PARTICULAR PARA LOS PERFILES ENSAYADOS.

De acuerdo a los resultados obtenidos se realiza una propuesta de una ecuación que describe el comportamiento particular para los perfiles ensayados, la cual consiste en evaluar un factor Ω que actuaría como coeficiente de las relaciones de esbeltez determinando una nueva expresión T la cual modifica la Ecuación 7, Ecuación 8 y Ecuación 9 del presente documento generando una nueva relación de esbeltez. El factor Ω afecta tanto la relación de esbeltez total de la sección completa alrededor del eje del miembro armado como también el parámetro definido por el cociente entre el parámetro de separación entre cordones(a) y el radio de giro mínimo del área transversal total no reducida de una sección individual en un miembro armado (r_i).

La ecuación 13 expresa la nueva relación de esbeltez propuesta modificada por el factor Ω .

Ecuación 13 Relación de esbeltez modificada por parámetro omega

$$T = \sqrt{\left(\frac{kL}{r_y\Omega}\right)^2 + \left(\frac{\Omega a}{r_{iy}}\right)^2}$$

A continuación, se presentan los cálculos para demostrar el ajuste de los resultados experimentales con los arrojados por la nueva expresión adoptada para la relación de esbeltez modificada por el factor Ω .

Se evalúa para cada condición de apoyo y separación de cordones de soldadura, teniendo en cuenta además las propiedades de los materiales y la geometría de la sección transversal.

Para la condición de apoyo articulada-articulada con cordón de soldadura corrido se tiene:

$$\dot{A}rea : 642.38mm^2$$

$$rx = 39.93mm, ry = 37.82mm; Ix = 1023644mm^4; Iy = 918656mm^4$$

$$E = 200000 \frac{N}{mm^2}; Fy = 350 \frac{N}{mm^2}$$

$$rix = 39.92mm; riy = 18.597mm$$

$$k = 1$$

$$Lo = 2000mm$$

$$a = 0mm$$

$$\psi x = \frac{a}{rix} = 0; \psi y = \frac{a}{riy} = 0$$

$$\Omega = 0.631$$

$$T = \left(\left(\frac{kLo}{ry\Omega} \right)^2 + \left(\frac{\Omega a}{riy} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 83.81$$

$$Fey = \frac{E(\pi)^2}{(T)^2} = 281.04 \frac{N}{mm^2}$$

$$\lambda cy = \sqrt[2]{\frac{Fy}{Fey}} = 1.12$$

$$Fny = 0.658^{\lambda cy^2} Fy = 207.82MPa$$

$$\phi = 0.85$$

$$\phi Pny = \phi Fny \times \dot{A}rea = 133.4kN$$

Para las demás configuraciones se procede de forma análoga.

En Tabla 8 se muestran los valores de Ω acordes a los 6 casos estudiados junto con los valores experimentales

Tabla 8 Valores de omega para casos estudiados

| a (mm) | Apoyo | Ω | T | Pn[kN] | Pn Experimental [kN] |
|--------|-------|----------|-------|--------|----------------------|
| 0 | A-A | 0.631 | 83.94 | 113.4 | 113.3 |
| 475 | A-A | 0.792 | 69.77 | 133.2 | 133.2 |
| 633 | A-A | 0.83 | 69.70 | 133.3 | 133.3 |
| 0 | E-A | 0.446 | 83.00 | 114.6 | 114.6 |
| 475 | E-A | 0.524 | 71.96 | 130.1 | 130.1 |
| 633 | E-A | 0.555 | 69.32 | 133.8 | 133.8 |

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación se enfatizó en el estudio del comportamiento a compresión pura de secciones tipo cajón a partir de perfiles de acero en “C” laminados en frío con diferentes configuraciones de soldadura. El interés que presenta esta investigación radica en que muy pocos estudios han trabajado en la capacidad máxima a carga axial de las secciones conformadas por estos perfiles cuando la distancia de separación entre los cordones de soldadura que los une esta por fuera del rango recomendado por los reglamentos internacionales que rigen el diseño de estructuras utilizando como material el acero laminado en frío.

Como ya se mencionó anteriormente, en la práctica constructiva diaria se siguen empleando perfiles en C en contacto entre sus labios o pestañas (a pesar de contar con perfiles tubulares en el mercado) y la tendencia es aumentar la distancia entre cordones pues con ello se logra mayor rapidez de ejecución de la obra y se expone menos el material al debilitamiento característico que conlleva la aplicación de la soldadura.

- Este estudio demostró que las ecuaciones del reglamento NSR-10 que predicen la carga máxima de los perfiles C en contacto en sus pestañas y unidos mediante cordones de soldadura separados, sometidos a carga axial sobreestiman sus capacidades cuando los valores de separación están por encima de 300 mm en porcentajes de hasta 15% para el caso biarticulado y 25% para el caso empotrado-articulado.
- Experimentalmente se observó que los perfiles mostraron resistencia similar (130 kN) sin importar la condición de apoyo en separaciones de 475 mm y 633 mm, mientras que los perfiles con cordón continuo su resistencia fue inferior en un 15% (113 kN), debido a la afectación sufrida por los altos cambios de temperatura a los que fueron sometidas en el momento de la

aplicación de la soldadura. De aquí la tendencia empírica de espaciar más los cordones de soldadura pues ahorra tiempo y el perfil posee un mejor desempeño.

- Para el caso de separaciones de 475 mm y 633 mm entre cordones de soldadura, el software CFS presenta resultados más cercanos a los experimentales y no sobreestima los valores de capacidad axial como es la tendencia del reglamento NSR-10. Para el caso concreto del cordón continuo CFS también entrega un resultado coherente al experimental pero no tan cercano como en las otras separaciones.
- El software de modelación en elementos finitos COMSOL subestima los valores experimentales en un porcentaje aproximado del 15% en la mayoría de los casos.
- La tendencia actual de colocar menos cordones de soldadura para mantener en contacto mediante sus pestañas dos perfiles en C, es una práctica de la cual no se debe abusar hasta establecer parámetros de seguridad que garanticen un comportamiento más cercano a la realidad.
- Al no estar los resultados experimentales dentro de los parámetros del reglamento NSR-10 se recomienda no seguir usando esta práctica en la conformación de secciones armadas, pues no es posible predecir el comportamiento de forma precisa de acuerdo a la reglamentación vigente.

6. RECOMENDACIONES

Se considera importante investigar con mayor profundidad el comportamiento de los perfiles tipo cajón conformados por secciones en C, proponiéndose:

- Extender los estudios expuestos en esta investigación al análisis del comportamiento de secciones con diferentes longitudes efectivas, espesores y separaciones entre cordones de soldaduras, lo cual permitirá tener certeza de los expresados en este documento.
- Incluir en los modelos usados en esta investigación la no linealidad geométrica y del material, para determinar la influencia de estas características en las capacidades de los perfiles para diferentes configuraciones de soldadura y apoyos.
- Al estar esta práctica constructiva por fuera de la normatividad se recomienda suspender su uso en campo, pues basados en los resultados obtenidos se demuestra que se obtienen valor de carga axial inferiores a los teóricos.

BIBLIOGRAFÍA

- AIS. 2010. *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10*.
http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_0926_2010_diario_oficial.pdf.
- AISC. 2005. «American Institute of Steel Construction». *Inc., Thirteenth Edition, First Print*.
- AISI. 2002. *North American Specification for the design of cold-formed steel structural members*. American Iron and Steel Institute.
- Aslani, Farhang, y Subhash C. Goel. 1991. «An analytical criterion for buckling strength of built-up compression members». *Eng J* 28 (4): 159–168.
- Cedeño-Rosete, R., y J. C. Gatica-Galina. 2005. «Capacidad Resistente a Flexión y Cortante de Vigas de Acero Mediante la Aplicación Mathcad». *Información tecnológica* 16 (1): 61–68.
- Chajes, Alexander, S. J. Britvec, y George Winter. 1963. «Effects of cold-straining on structural sheet steels». *Journal of the Structural Division* 89 (2): 1–32.
- COMSOL. 2014. *2014. Version 4.4. COMSOL, Inc., Burlington, MA, USA*. 2014.
- Hsiao, Ling-En, Wei-Wen Yu, y Theodore V. Galambos. 1990. «AISI LRFD method for cold-formed steel structural members». *Journal of Structural Engineering* 116 (2): 500–517.
- Korvink, S. A., G. J. Van den Berg, y P. Van der Merwe. 1995. «Web crippling of stainless steel cold-formed beams». *Journal of Constructional Steel Research* 34 (2): 225–248.
- Kulatunga, M. P., M. Macdonald, J. Rhodes, y D. K. Harrison. 2014. «Load capacity of cold-formed column members of lipped channel cross-section with perforations subjected to compression loading – Part I: FE simulation and test results». *Thin-Walled Structures* 80 (julio): 1-12.
doi:10.1016/j.tws.2014.02.017.
- Liew, Andrew, y Leroy Gardner. 2015. «Ultimate capacity of structural steel cross-sections under compression, bending and combined loading». *Structures* 1 (febrero): 2-11. doi:10.1016/j.istruc.2014.07.001.
- Mirambell, E., y E. Real. 2000. «On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation». *Journal of Constructional Steel Research* 54 (1): 109–133.
- Rasmussen, K. J. R., y G. J. Hancock. 1993. «Design of cold-formed stainless steel tubular members. II: Beams». *Journal of Structural Engineering* 119 (8): 2368–2386.
- Reyes, Wilson, y Andrés Guzmán. 2011. «Evaluation of the slenderness ratio in built-up cold-formed box sections». *Journal of Constructional Steel Research* 67 (6): 929–935.
- Shanmugam, N. E., S. P. Chiew, y S. L. Lee. 1988. «Strength of cold-formed steel box columns».

- <http://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1235&context=isccs>
S.
- Smith, W. Shearer. 1951. «Cold-formed sections in structural practice with a proposed design specification». *Struct. Engr* 29: 165–168.
- Uribe, Jairo, y George Winter. 1969. «Aspects of the effects of cold-forming on the properties and performance of light-gage structural members». <http://scholarsmine.mst.edu/ccfss-library/130/>.
- Van Den Berg, G. J. 2000. «The effect of the non-linear stress–strain behaviour of stainless steels on member capacity». *Journal of Constructional Steel Research* 54 (1): 135–160.
- Yu, Wei-Wen, y Roger A. LaBoube. 2010. *Cold-formed steel design*. John Wiley & Sons.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BI2Ax7hNIlcC&oi=fnd&pg=PR9&dq=%C2%ABCold-Formed+Steel+Design+-+Wei-Wen+Yu,+Roger+A.+LaBoube+-+Google+Libros%C2%BB+&ots=4Uk-p3T938&sig=y6SpV2Mn3egHLCKwlkwrYyaYHXM>.